21世纪全国高等院校自动化系列实用规划教材



传感器基础

（第2版）

主　编　赵玉刚　邱　东





说　明

本书电子版仅提供给高校任课教师使用，如有任课教师需要全本教材浏览或需要本书课件等相关教学资料，请联系北京大学出版社客服，微信手机同号：15600139606，扫下面二维码可直接联系。

由于教材版权所限，仅限任课教师索取，谢谢！



第 1 章　传感器理论基础

【教学目标】

要求了解传感器技术的发展；掌握传感器的概念、特性及组成；检测的概念、测量方法及误差；检测系统与传感器的关系；熟悉传感器的命名和测量数据的处理方法。

【教学要求】

知识要点	能力要求	相关知识
传感器基础知识	了解传感器的发展，掌握传感器的概念、组成、特性	物理、数学
检测技术知识	掌握检测的概念、误差的表示和分类、数据的处理	电路、电子等
检测系统	熟悉传感器与系统的关系	综合

【导入案例】

传感器技术史现代信息技术的主要内容之一，是检测和自动控制应用中的主要环节。把计算机看成人的大脑，通信就相当于神经网络，而传感器就相当于人的感官。如人眼相当于光电传感器（光敏元件、电荷耦合器件 CCD 等）；人耳相当于声传感器（压电元件等）；皮肤相当于触觉传感器（热敏电阻、力敏聚合物等）。

在工业自动化生产中，各种参数的监测；在航天领域，宇宙飞船的速度、位置、温度、压力和磁场等参数的测量；在机器人的研究中，外部的平面和立体视觉传感器、触觉传感器、热觉传感器、力觉传感器和滑觉传感器等，智能机器人模型见图 1a；在智能建筑系统中，安全防护、防盗、防火和放燃气泄露等，用到了 CCD 电子监视器、烟雾传感器、气体传感器、玻璃破碎传感器和红外传感器，门禁系统中的指纹传感器等，见图 1b 所示；在医疗诊断中，超声波检查、核磁共振、心电图和照像等，见图 1 所示；人们日常生活中，汽车的倒车雷达见图 1 所示、家用电冰箱、空调、电饭煲和洗衣机等，都用到了各种传感器。

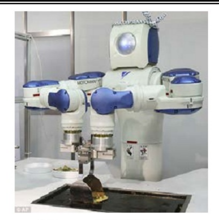

图 a　智能机器人


图 b　指纹门禁


图 c　医疗诊断


图 d　可视倒车

图 1　传感器的应用

在系统学习各类传感器之前，首先应该掌握传感器的基本理论及检测技术的相关知识，主要包括传感器的概念、分类和基本特性，检测系统的组成与功能，基本测量方法，测量误差及数据处理等内容，为后续知识的学习打下基础。

1.1　传感器基础

在当今的信息时代，人们越来越迫切地希望能准确地掌握自然界和生产领域更多的各类信息，而传感器则是人们获取这些信息的主要途径和手段，因此传感器与人们的关系越来越密切。传感器是实现自动检测和自动控制的首要环节，它对于提高生产的自动化程度、促进现代科学技术的发展具有极其重要的作用。

1.1.1　传感器的概念

关于传感器的概念，我国国家标准 GB 7665　1987 规定：“传感器(sensor)是能感受规定的测量量并按一定规律转换成可用输出信号的器件或装置”。也就是说，传感器是一种按一定的精度把被测量转换为与之有确定关系的、便于应用的某种物理量的测量器件或装

置，用于满足系统信息传输、存储、显示、记录及控制等要求。

① 传感器首先是一种测量器件或装置，它的作用体现在测量上。例如我们常见的发电机，它是一种可以将机械能转变成电能的转换装置，从能量转换的角度看，它是一种发电设备，不能称之为传感器；但从另一个角度看，人们可以通过发电机发电量的大小来测量调速系统的机械转速，这时，发电机就可看成是一种用于测量转速的测量装置，是一种速度传感器，通常称之为测速发电机。应用传感器的目的就是为了获得被测量的准确信息，这也是本课程的学习目的。

② 传感器定义中所谓"可用输出信号"是指便于传输、转换及处理的信号，主要包括气、光和电等信号，现在一般就是指电信号(如电压、电流、电势及各种电参数等)，而"规定的测量量"一般是指非电量信号，主要包括各种物理量、化学量和生物量等，在工程中常需要测量的非电量信号有力、压力、温度、流量、位移、速度、加速度、转速、浓度等。正是由于这类非电量信号不能像电信号那样可由电工仪表和电子仪器直接测量，所以就需要利用传感器技术实现由非电量到电量的转换。

③ 传感器的输入和输出信号应该具有明确的对应关系，并且应保证一定的精度。

④ 关于"传感器"这个词，目前国外还有许多提法，如变换器(transducer)、转换器(converter)、检测器(detector)和变送器(transmitter)等，而根据我们国家的规定，传感器定名为 sensor；当传感器的输出信号为标准信号(1V～5V、4mA～20mA)时，称为变送器(transmitter)，注意二者不要混淆。

1.1.2　传感器的组成和分类

1．传感器的组成

传感器的种类繁多，其工作原理、性能特点和应用领域各不相同，所以结构、组成差异很大。但总的来说，传感器通常由敏感元件、转换元件及测量电路组成，有时还加上辅助电源，如图 1.1 所示。

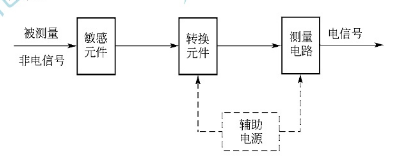


图 1.1　传感器组成框图

1) 敏感元件(sensing element)

敏感元件是指传感器中能直接感受被测量的变化，并输出与被测量成确定关系的某一物理量的元件。敏感元件是传感器的核心，也是研究、设计和制作传感器的关键。如图 1.2 所示是一气体压力传感器的示意图。膜盒 2 的下半部与壳体 1 固定，上半部通过连杆与磁芯 4 相连，磁芯 4 置于两个电感线圈 3 中，后者接入测量电路 5。这里的膜盒就是敏感元件，其外部与大气压力 p_a 相通，内部感受被测压力 p。当 p 变化时，引起膜盒上半部移动，

即输出相应的位移量。

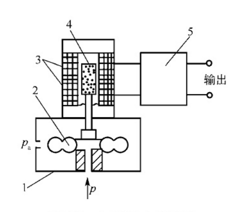


图 1.2　气体压力传感器

1—壳体；2—膜盒；3—电感线圈；4—磁芯；5—测量电路。

2) 转换元件(transduction element)

转换元件是指传感器中能将敏感元件输出的物理量转换成适于传输或测量的电信号的部分。在图 1.2 中，转换元件是可变电感线圈 3，它把输入的位移量转换成电感的变化。

需要指出的是，并不是所有的传感器都能明显地区分敏感元件和转换元件两部分，有的传感器转换元件不止一个，需要经过若干次的转换；有的则是二者合二为一。

3) 测量电路(measuring circuit)

测量电路又称转换电路或信号调理电路，它的作用是将转换元件输出的电信号进行进一步的转换和处理，如放大、滤波、线性化、补偿等，以获得更好的品质特性，便于后续电路实现显示、记录、处理及控制等功能。测量电路的类型视传感器的工作原理和转换元件的类型而定，一般有电桥电路、阻抗变换电路、振荡电路等。

2．传感器的分类

通常，一种传感器可以检测多种参数，一种参数又可以用多种传感器测量，所以传感器的分类方法也很多，至今尚无统一规定，归纳起来一般有以下几种。

1) 按工作原理分类

这是传感器最常见的分类方法，这种分类方法将物理、化学、生物等学科的原理、规律和效应作为分类的依据，有利于对传感器工作原理的阐述和对传感器的深入研究与分析，本书主要就是按这一分类方法作为编写体系介绍各种类型的传感器。

按照传感器工作原理的不同，传感器可分为电参数式传感器(包括电阻式、电感式和电容式传感器)、压电式传感器、光电式传感器(包括一般光电式、光纤式、激光式和红外式传感器等)、热电式传感器、半导体式传感器、波式和辐射式传感器等。这些类型的传感器大部分是分别基于其各自的物理效应原理命名的。

2) 按被测量分类

按被测量的性质进行分类，有利于准确表达传感器的用途，对人们系统地使用传感器很有帮助。为更加直观、清晰地表述各类传感器的用途，将种类繁多的被测量分为基本被测量和派生被测量，见表 1-1。对于各派生被测量的测量亦可通过对基本被测量的测量来实现。

表 1-1　基本被测量和派生被测量

基本被测量		派生被测量
位移	线位移	长度、厚度、应变、振动、磨损、平面度
	角位移	旋转角、偏转角、角振动
速度	线速度	振动、流量
	角速度	转速、角振动
加速度	线加速度	振动、冲击、质量
	角加速度	角振动、转矩、转动惯量
力	压力	重量、应力、力矩
时间	频率	周期、计数
光		光通量与密度、光谱
温度		热容
湿度		水汽、含水量、露点
浓度		气(液)体成分、黏度

3) 按结构分类

按传感器的结构构成可分为结构型、物性型和复合型传感器。

结构型传感器是依靠传感器结构参数(如形状、尺寸等)的变化，利用某些物理规律，实现信号的变换，从而检测出被测量，它是目前应用最多、最普遍的传感器。这类传感器的特点是其性能以传感器中元件相对结构(位置)的变化为基础，而与其材料特性关系不大。

物性型传感器则是利用某些功能材料本身所具有的内在特性及效应将被测量直接转换成电量的传感器。例如，热电偶传感器就是利用金属导体材料的温差电动势效应和不同金属导体间的接触电动势效应实现对温度的测量的；而利用压电晶体制成的压力传感器则是利用压电材料本身所具有的压电效应实现对压力的测量。这类传感器的“敏感元件”就是材料本身，无所谓“结构变化”，因此，通常具有响应速度快的特点，而且易于实现小型化、集成化和智能化。

复合型传感器则是结构型和物性型传感器的组合，同时兼有二者的特征。

4) 按能量转换关系分类

按照传感器的能量转换情况，传感器可分为能量控制型和能量转换型传感器两大类。

所谓能量控制型传感器是指其变换的能量是由外部电源供给的，而外界的变化(即传感器输入量的变化)只起到控制的作用。如电阻、电感、电容等电参数传感器、霍耳传感器等都属于这一类传感器。

能量转换型传感器，主要由能量变换元件构成，它不需要外电源。如基于压电效应、热电效应、光电效应等的传感器都属于此类传感器。

此外，根据被测量的性质，可以将传感器分成物理型、化学型和生物型传感器三大类；根据传感器的使用材料，也可以将传感器分为半导体传感器、陶瓷传感器、金属材料传感器、复合材料传感器、高分子材料传感器等；根据应用领域的不同，还可分为工业用、农用、民用、医用及军用等不同类型；根据具体的使用目的，又可分为测量用、监视用、检

查用、诊断用、控制用和分析用传感器等。

1.1.3　传感器的基本特性

为了更好地掌握和使用传感器，必须充分地了解传感器的基本特性。传感器的基本特性是指系统的输出输入关系特性，即系统输出信号 $y(t)$ 与输入信号(被测量) $x(t)$ 之间的关系，如图 1.3 所示。

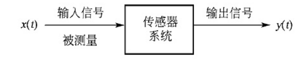


图 1.3　传感器系统

根据传感器输入信号 $x(t)$ 是否随时间变化，其基本特性分为静态特性和动态特性，它们是系统对外呈现出的外部特性，但与其内部参数密切相关。不同的传感器内部参数不同，因此其基本特性也表现出不同的特点。一个高精度传感器，必须具有良好的静态特性和动态特性，才能保证信号无失真地按规律转换。

1．静态特性

当传感器的输入信号是常量，不随时间变化(或变化极缓慢)时，其输出输入关系特性称为静态特性。传感器的静态特性主要由下列几种性能来描述。

1) 测量范围(measuring range)

传感器所能测量到的最小输入量 $x_{\min}$ 与最大输入量 $x_{\max}$ 之间的范围称为传感器的测量范围。

2) 量程(span)

传感器测量范围的上限值 $x_{\max}$ 与下限值 $x_{\min}$ 的代数差 $x_{\max}-x_{\min}$，称为量程。

3) 精度(accuracy)

传感器的精度是指测量结果的可靠程度，是测量中各类误差的综合反映，测量误差越小，传感器的精度越高。

传感器的精度用其量程范围内的最大基本误差与满量程输出之比的百分数表示，其基本误差是传感器在规定的正常工作条件下所具有的测量误差，由系统误差和随机误差两部分组成。系统误差迟滞与线性度所表示的误差为传感器的系统误差，重复性所表示的误差为随机误差。所以传感器的精度 A 表示为

$$S=\frac{\Delta}{y_{FS}}\times 100\% \tag{1-1}$$

式中　S —— 传感器精度；

Δ —— 测量范围内允许的最大基本误差；

y_{FS} —— 满量程输出(FS 是英文 Full Scale(满量程)的缩写)；

工程技术中为简化传感器精度的表示方法，引用了精度等级的概念。精度等级以一系列标准百分比数值分档表示，代表传感器测量的最大允许误差。

如果传感器的工作条件偏离正常工作条件，还会带来附加误差，温度附加误差就是最

主要的附加误差。

4) 线性度(linearity)

所谓传感器的线性度是指其输出量与输入量之间的关系曲线偏离理想直线的程度，又称为非线性误差。如不考虑迟滞、蠕变等因素，一般传感器的输出输入特性关系可用 n 次多项式表示为

$$y = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \cdots + a_n x^n \tag{1-2}$$

式中，x 为输入量；y 为输出量；a_0 为零输入时的输出，也叫零位输出；a_1 为传感器线性项系数，也称为线性灵敏度；a_2，a_3，…，a_n 为非线性项系数。在不考虑零位输出的情况下，传感器的线性度可分为以下几种情况。

(1) 理想线性特性

当式(1-2)中 a_1 为常数，而 $a_0 = a_2 = a_3 = \cdots = a_n = 0$ 时，即

$$y = a_1 x \tag{1-3}$$

称为理想线性特性，如图 1.4(a)所示，这时传感器的线性最好，也是我们最希望传感器所具有的特性。具有该特性的传感器的灵敏度为直线 $y = a_1 x$ 的斜率，即

$$k = y/x = a_1 = 常数 \tag{1-4}$$

(2) 仅有偶次非线性项

传感器的输出输入特性为

$$y = a_0 + a_2 x^2 + a_4 x^4 + \cdots + a_{2n} x^{2n},\ n = 0,\ 1,\ 2,\ \cdots \tag{1-5}$$

由于没有对称性，此特性线性范围较窄，线性度较差，如图 1.4(b)所示，一般传感器设计很少采用这种特性。

(3) 仅有奇次非线性项

传感器的输出输入特性为

$$y = a_1 + a_3 x^3 + a_5 x^5 + \cdots + a_{2n+1} x^{2n+1},\ n = 0,\ 1,\ 2,\ \cdots \tag{1-6}$$

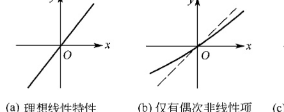
此传感器特性相对于坐标原点对称，其线性范围较宽，线性度较好，如图 1.4(c)所示，是比较接近于理想直线的非线性特性。

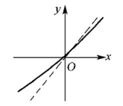
(4) 普遍情况

一般情况下，传感器的输出输入特性为

$$y = a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 + \cdots + a_n x^n \tag{1-7}$$

如图 1.4(d)所示。





(a) 理想线性特性　(b) 仅有偶次非线性项　(c) 仅有奇次非线性项　(d) 普遍情况的输入输出特性

图 1.4　传感器的非线性

在实际使用非线性传感器时，如果非线性项的次数不高，则在输入量变化范围不大的情况下，可采用直线近似地代替实际输入输出特性曲线的某一段，使传感器的非线性特性

得到线性化处理，这里所采用的直线称为拟合直线。实际输入输出特性曲线与拟合直线的最大相对误差，就是非线性误差，用 γ_L 来表示，即

$$\gamma_L = \pm \frac{\Delta L_{max}}{y_{FS}} \times 100\% \tag{1-8}$$

式中　ΔL_{max} —— 非线性最大误差；

y_{FS} ——满量程输出值。

目前常用的拟合方法有：理论拟合、过零旋转拟合、端点拟合、端点平移拟合及最小二乘拟合等。

在图 1.5(a)中，拟合直线为传感器的理论特性，与实际测试值无关，这种方法称为理论拟合，应用十分简便，但一般说来 ΔL_{max} 很大。

图 1.5(b)为过零旋转拟合，常用于校正特性曲线过零的传感器。拟合时，使 $\Delta L_1 = \Delta L_2 = \Delta L_{max}$，这种方法也比较简单，非线性误差比前一种小很多。

图 1.5(c)所示的端点拟合，是把实际特性曲线两端点的连线作为拟合直线。这种方法比较简便，但 ΔL_{max} 较大。

图 1.5(d)是在图 1.5 (c)的基础上使直线平移，移动距离为图 1.5 (c)的 ΔL_{max} 的 $\frac{1}{2}$。这条特性曲线分布于拟合直线的两侧，$\Delta L_1 = \Delta L_2 = \Delta L_3 = \Delta L_{max}$，与图 1.5(c)相比，非线性误差减小了 $\frac{1}{2}$，提高了精度。

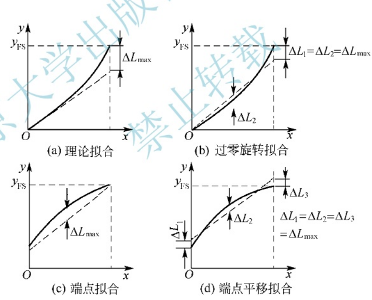


图 1.5　各种直线拟合方法

最小二乘法拟合是选取在量程范围内与特性曲线上各点的偏差平方和最小的直线作为拟合直线，这种拟合方法有严格的数学依据，尽管计算过程复杂，但得到的拟合直线精度高，误差小。

5) 灵敏度(sensitivity)

灵敏度是指传感器输出的变化量与引起该变化量的输入变化量之比，即

$$k = \frac{\Delta y}{\Delta x} \tag{1-9}$$

对于线性传感器，它的灵敏度就是其特性曲线的斜率，是一个常数，与输入量大小无关；而对于非线性传感器，其灵敏度是一个随工作点而变的变量，如图 1.6 所示。一般希望传感器的灵敏度高，且在满量程范围内是恒定的，这样就可保证在传感器输入量相同的情况下，输出信号尽可能大，从而有利于对被测量的转换和处理。

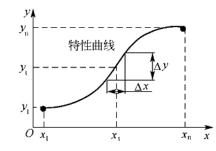


图 1.6　传感器的灵敏度

由于某种原因，会引起灵敏度变化，产生灵敏度误差。灵敏度误差用相对误差表示，即

$$\gamma_S = \frac{\Delta k}{k} \times 100\% \tag{1-10}$$

6) 分辨率和阈值(resolution and threshold)

传感器能检测到输入量最小变化量的能力称为分辨力。对于某些传感器，如电位器式传感器，当输入量连续变化时，输出量只做阶梯变化，则分辨力就是输出量的每个“阶梯”所代表的输入量的大小。对于数字式仪表，分辨力就是仪表指示值的最后一位数字所代表的值。当被测量的变化量小于分辨力时，数字式仪表的最后一位数不变，仍指示原值。

当分辨力以满量程输出的百分数表示时则称为分辨率。

阈值是指能使传感器的输出端产生可测变化量的最小被测输入量值，即零点附近的分辨力。有的传感器在零位附近有严重的非线性，形成所谓“死区”(dead band)，则将死区的大小作为阈值；更多情况下，阈值主要取决于传感器噪声的大小，因而有的传感器只给出噪声电平。

7) 重复性(repeatability)

重复性是指传感器在输入量按同一方向作全量程连续多次变动时所得特性曲线间不一致的程度。各条特性曲线越靠近，则说明重复性就越好。如图 1.7 所示为输出特性曲线的重复特性，正行程的最大重复性偏差为 ΔR_{max1}，反行程的最大重复性偏差为 ΔR_{max2}。重复性偏差取这两个最大偏差中之较大者为 ΔR_{max}，再以满量程输出的百分数表示，这就是重复误差，即

$$\gamma_R = \pm\frac{\Delta R_{max}}{y_{FS}} \times 100\% \tag{1-11}$$

重复性是反映传感器精密程度的重要指标。同时，重复性的好坏也与许多随机因素有关，它属于随机误差，要用统计规律来确定。

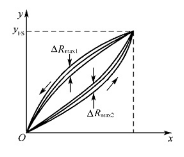


图 1.7　传感器的重复性

8) 迟滞(hysteresis)

迟滞特性表明传感器在正(输入量增大)反(输入量减小)行程中输出与输入曲线不重合的程度，如图 1.8 所示。迟滞大小一般由实验方法测得。迟滞误差以正、反向输出量的最大偏差与满量程输出之比的百分数表示，即

$$\gamma_{H} = \pm \frac{1}{2} \frac{\Delta H_{max}}{y_{FS}} \times 100\% \tag{1-12}$$

式中　ΔH_{max} —— 正、反行程间输出的最大误差。

传感器材料的物理性质是产生迟滞的主要原因。例如，把应力施加于某弹性材料时，弹性材料产生形变，应力取消后，弹性材料仍不能完全恢复原状。又如，铁磁体、铁电体在外加磁场、电场作用下也均有迟滞现象。

此外，传感器机械部分存在不可避免的缺陷，如摩擦、磨损、间隙、松动、积尘等也是造成迟滞现象的重要原因。

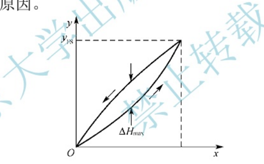


图 1.8　传感器的迟滞特性

9) 稳定性(stability)

稳定性表示传感器在一个较长的时间内保持其性能参数的能力。理想的情况是不论什么时候，传感器的特性参数都不随时间变化。但实际上，随着时间的推移，大多数传感器的特性会发生改变。这是因为敏感元件或构成传感器的部件，其特性会随时间发生变化，从而影响了传感器的稳定性。

稳定性一般以室温条件下经过一规定时间间隔后，传感器的输出与起始标定时的输出之间的差异来表示，称为稳定性误差。稳定性误差可用相对误差表示，也可用绝对误差来表示。

10) 飘移(drift)

传感器的漂移是指在外界的干扰下，在一定时间间隔内，传感器输出量发生与输入量无关的、不需要的变化。飘移量的大小也是衡量传感器稳定性的重要性能指标。传感器的

飘移有时会导致整个测量或控制系统处于瘫痪。

漂移包括零点漂移和灵敏度漂移等，如图 1.9 所示。

零点漂移和灵敏度漂移又可分为时间漂移和温度漂移。时间漂移是指在规定的条件下，零点或灵敏度随时间缓慢变化。温度漂移则是由环境温度变化而引起的零点或灵敏度的漂移。

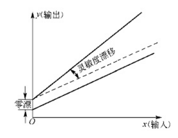


图 1.9　传感器的飘移

2．动态特性

以上介绍的是传感器的静态特性，即输入信号是不随时间变化的。但大多数情况下传感器的输入信号是随时间变化的动态信号，这时就要求传感器能时刻精确地跟踪输入信号，按照输入信号的变化规律输出信号。当传感器输入信号的变化缓慢时，是容易跟踪的，但随着输入信号的变化加快，传感器随动跟踪性能会逐渐下降。输入信号变化时，引起输出信号也随时间变化，这个过程称为响应。动态特性就是指传感器对于随时间变化的输入信号的响应特性，通常要求传感器不仅能精确地显示被测量的大小，而且还能复现被测量随时间变化的规律，这也是传感器的重要特性之一。

传感器的动态特性与其输入信号的变化形式密切相关，在研究传感器动态特性时，通常是根据不同输入信号的变化规律来考察传感器响应的。实际传感器输入信号随时间变化的形式可能是多种多样的，最常见、最典型的输入信号是阶跃信号和正弦信号。这两种信号在物理上较容易实现，而且也便于求解。

对于阶跃输入信号，传感器的响应称为阶跃响应或瞬态响应，它是指传感器在瞬变的非周期信号作用下的响应特性。这对传感器来说是一种最严峻的状态，如传感器能复现这种信号，那么就能很容易地复现其他种类的输入信号，其动态性能指标也必定会令人满意。

而对于正弦输入信号，则称为频率响应或稳态响应。它是指传感器在振幅稳定不变的正弦信号作用下的响应特性。稳态响应的重要性，在于工程上所遇到的各种非电信号的变化曲线都可以展开成傅里叶(Fourier)级数或进行傅里叶变换，即可以用一系列正弦曲线的叠加来表示原曲线。因此，当已知道传感器对正弦信号的响应特性后，也就可以判断它对各种复杂变化曲线的响应了。

为便于分析传感器的动态特性，必须建立动态数学模型。建立动态数学模型的方法有多种，如微分方程、传递函数、频率响应函数、差分方程、状态方程、脉冲响应函数等。

建立微分方程是对传感器动态特性进行数学描述的基本方法。在忽略了一些影响不大的非线性和随机变化的复杂因素后，可将传感器作为线性定常系统来考虑，因而其动态数学模型可用线性常系数微分方程来表示。

能用一、二阶线性微分方程来描述的传感器分别称为一、二阶传感器，虽然传感器的

种类和形式很多，但它们一般可以简化为一阶或二阶环节的传感器(高阶可以分解成若干个低阶环节)，因此一阶和二阶传感器是最基本的。

当求解出微分方程的解后就能够得到系统的瞬态响应和稳态响应。微分方程的通解是系统的瞬态响应，特解是系统的稳态响应。对于一些较复杂的系统，求解微分方程比较麻烦，可采用数学上的拉普拉斯(Laplace)变换将实数域的微分方程变换成复数域的代数方程，这样可使运算简化，求解就相对容易了。

在采用阶跃输入信号研究传感器时域动态特性时，为表征传感器的动态特性，常用时间常数τ、上升时间t_r、响应时间t_s和超调量σ等参数来综合描述；在采用正弦输入信号研究传感器频域动态特性时，常用幅频特性和相频特性来描述，其重要指标是频带宽度(简称带宽)及相位误差等。对于各典型环节动态性能指标的分析和计算方法，在《自动控制原理》等课程中都有详细的阐述，因篇幅关系，这里就不一一介绍了。

1.1.4　传感器的命名及图形符号

中华人民共和国国家标准 GB 7666—87 规定了传感器的命名方法及图形符号，并将其作为统一传感器命名及图形符号的依据。该标准适用于传感器的生产、科学研究、教学及其他相关领域。

1. 传感器的命名

根据国标 GB 7666—87 的规定，传感器的全称应由“主题词+四级修饰语”组成，即

主题词 —— 传感器；

一级修饰语 —— 被测量，包括修饰被测量的定语；

二级修饰语 —— 转换原理，一般可后缀以“式”字；

三级修饰语 —— 特征描述，指必须强调的传感器结构、性能、材料特征、敏感元件及其他必要的性能特征，一般可后缀以“型”字；

四级修饰语 —— 主要技术指标(如量程、精度、灵敏度等).

几部分表述格式如图 1.10 所示。

在被测量、转换原理、序号三部分代号之间须有连字符“-”连接。

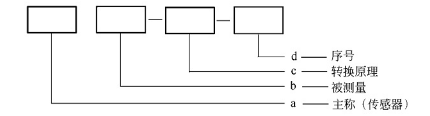
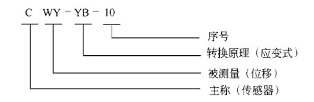
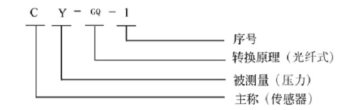


图 1.10　传感器产品代号的编制格式

例如：





2．传感器的图形符号

图形符号通常用于图样或技术文件中来表示一个设备或概念的图形、标记或字符。由于它能象征性或形象化地标记信息，因此可以越过语言障碍，直接地表达设计者的思想和意图，在实际中应用广泛。

传感器的图形符号是电气图用图形符号的一个组成部分。1994 年 2 月 1 日国家批准实施的 GB/T 14479—93《传感器图用图形符号》是与国际接轨的。按照此规定，传感器的图形符号由符号要素正方形和等边三角形组成，如图 1.11 所示。其中，正方形表示转换元件，三角形表示敏感元件。

图 1.11　传感器的图形符号

在使用这种图形符号时应注意以下几个问题：

(1) 表示转换原理的限定符号应写进正方形内，表示被测量的限定符号应写进三角形内，如图 1.12 所示。

(2) 当无须强调具体的转换原理时，传感器的图形符号可以简化，如图 1.13 所示。



图 1.12　传感器图形符号的说明(1)
x—被测量符号；　* —转换原理。

图 1.13　传感器图形符号的说明(2)
对角线—内在的能量转换功能；
(A)、(B)—输入、输出信号.

(3) 对于传感器的电气引线，应根据接线图设计需要，从正方形的三条边线垂直引出；如果引线需要接地或接壳体、接线板，应按照 GB 4728.2 中的规定绘制，如图 1.14 所示。

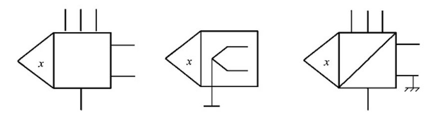


图 1.14　传感器图形符号的说明(3)

(4) 对于某些转换原理难以用图形符号简单、形象地表达时，例如离子选择电极式钠离子传感器，也可用文字符号替代，如图 1.15 所示。

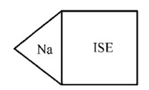


图 1.15　传感器图形符号的说明(4)

下面给出几种典型传感器的图形符号，如图 1.16 所示。

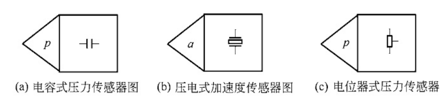


图 1.16　几种典型传感器图形符号

国标 GB/T 14479—93 给出了 43 种常用传感器的图形符号示例。标准规定，对于采用新型或特殊转换原理或检测技术的传感器，亦可参照标准的有关规定自行绘制，但必须经主管部门认可。

1.1.5　传感器的发展趋势

传感器作为人类认识和感知世界的一种工具，其发展历史相当久远，可以说是伴随着人类文明的进程而发展起来的。传感器技术的发展程度，影响、决定着人类认识世界的程度与能力。

随着科学的进步和社会的发展，传感器技术在国民经济和人们的日常生活中占有越来越重要的地位。人们对传感器的种类、性能等方面的要求越来越高，这也进一步促进了传感器技术的快速发展。目前许多国家都把传感器技术列为重点发展的关键技术之一。美国曾把 20 世纪 80 年代看成是传感器技术时代，并将其列为 20 世纪 90 年代 22 项关键技术之一，日本把传感器技术列为 20 世纪 80 年代十大技术之首。从 20 世纪 80 年代中后期开始，我国也把传感器技术列为国家优先发展的重要技术之一。

传感器技术是一项与现代技术密切相关的尖端技术，近年来发展很快，主要的特点及发展趋势表现在以下几个方面。

1. 发现利用新现象、新效应

利用物理现象、化学反应和生物效应是各种传感器工作的基本原理，所以发现新现象与新效应是发展传感器技术的重要工作，是研制新型传感器的理论基础，其意义极为深远。例如，日本夏普公司利用超导技术研制成功高温超导磁性传感器，是传感器技术的重大突破，其灵敏度高，仅次于超导量子干涉器件。但它的制造工艺远比超导量子干涉器件简单，可用于磁成像技术，具有广泛的推广价值。

2. 开发新材料

传感器材料是传感器技术发展的物质基础，随着材料科学的快速发展，人们可根据实际需要，控制传感器材料的某些成分或含量，从而设计制造出用于各种传感器的新的功能

材料。例如，用高分子聚合物薄膜制成温度传感器，用光导纤维制成压力、流量、温度、位移等多种传感器，用陶瓷制成压力传感器，用半导体氧化物制成各种气体传感器等。这些新材料的应用，极大地提高了各类传感器的性能，促进了传感器技术的发展。

3. 采用高新技术

随着微电子技术、计算机技术、精密机械技术、高密封技术、特种加工技术、集成技术、薄膜技术、网络技术、纳米技术、激光技术、超导技术、生物技术等高新技术的迅猛发展，传感器技术进入了一个更为广阔的发展空间。高新技术成果的采用，成为传感器技术发展的技术基础和强大推动力。因此，传感器的高科技化不但是传感器技术的主要特征，而且也是新世纪传感器及其产业的发展方向。

4. 拓展应用领域

目前检测技术正在向宏观世界和微观世界的纵深发展。空间技术、海洋开发、环境保护以及地震预测等都要求检测技术满足开发、研究宏观世界的要求，而细胞生物学、遗传工程、光合作用、医学及微加工技术等又希望检测技术跟上研究微观世界的步伐，因此，科学的发展对当前传感器技术的研究、开发提出许多新的要求，其中重要的一点就是要拓宽应用领域和检测范围，不断突破参数测量的极限。通过这些应用领域的开发和研究，不但可以提高传感器的应用性能，而且还可以促进其他相关技术的发展，甚至会诞生一些新学科。

5. 提高传感器的性能

检测技术的发展，必然要求传感器的性能不断提高。例如，对于火箭发动机燃烧室的压力测量，希望测量精度高于 0.1%；对于超精密机械加工的在线测量，要求误差小于 0.1 μm 等，由此需要人们研制出更多性能优异的各类传感器。

对传感器而言，其主要性能指标包括：检测精度、线性度、灵敏度和稳定性等，其中检测精度是其中最重要的性能指标。在 20 世纪 30 年代～40 年代，检测精度一般为百分之几到千分之几。近年来，随着传感器技术的不断发展，其检测精度提高很快，有些被测量的检测精度可达万分之几，甚至百万分之几。例如，用直线光栅测线位移时，测量范围在几米时，误差仅为几微米。

6. 传感器的微型化与低功耗

目前各种测控仪器设备的功能越来越强大，同时各个部件的体积却越来越小，这就要求传感器自身的体积也要小型化、微型化，现在一些微型传感器，其敏感元件采用光刻、腐蚀、沉积等微机械加工工艺制作而成，尺寸可以达到微米级。此外，由于传感器工作时大多离不开电源，在野外或远离电网的地方，往往是用电池或太阳能等供电，因此开发微功耗的传感器及无源传感器就具有重要的实际意义，这样不仅可以节省能源，又可以提高系统的工作寿命。

7. 传感器的集成化与多功能化

所谓传感器的集成化，是指将信息提取、放大、变换、传输以及信息处理和存储等功

能都制作在同一基片上，实现一体化。与一般传感器相比，它具有体积小、反应快、抗干扰、稳定性好及成本低等优点。目前随着半导体集成技术与厚、薄膜技术的不断发展，传感器的集成化已成为传感器技术发展的一种趋势。

传感器的多功能化是与“集成化”相对应的一个概念，是指传感器能感知与转换两种以上不同的物理量，例如，使用特殊的陶瓷材料把温度和湿度敏感元件集成在一起，制成温湿度传感器；将检测几种不同气体的敏感元件用厚膜制造工艺制作在同一基片上，制成检测氧、氨、乙醇、乙烯等气体的多功能传感器等。利用多种物理、化学及生物效应使传感器多功能化，已日益成为当今传感器发展的方向。

8. 传感器的智能化与数字化

利用计算机及微处理技术使传感器智能化是 20 世纪 80 年代以来传感器技术的一大飞跃。智能传感器是一种带有微处理器的传感器，与一般传感器相比它不仅具有信息提取、转换等功能，而且还具有数据处理、双向通信、信息记忆存储、自动补偿及数字输出等功能。随着人工神经网络、人工智能和信息处理技术(如多传感器信息融合技术、模糊理论等)的进一步发展，智能传感器将具有更高级的分析、决策及自学习功能，可完成更复杂的检测任务。

此外，目前传感器的功能已突破传统的界限，其输出不再是单一的模拟信号，而是经过微处理器处理过的数字信号，有的甚至带有控制功能，这就是所谓的数字传感器。数字传感器的特点：一是将模拟信号转换成数字信号输出，提高了传感器的抗干扰能力，特别适用于电磁干扰强、信号传输距离远的工作现场；二是可通过软件对传感器进行线性修正及性能补偿，减少了系统误差；三是一致性与互换性好。

可以预见，随着计算机和微处理技术的不断发展，智能化、数字化传感器一定会迎来更为广阔的发展前景。

9. 传感器的网络化

传感器的网络化是传感器领域近些年发展起来的一项新兴技术，它利用 TCP/IP 协议，使现场测量数据就近通过网络与网络上有通信能力的节点直接进行通信，实现了数据的实时发布和共享。由于传感器自动化、智能化水平的提高，多台传感器联网已推广应用，虚拟仪器、三维多媒体等新技术已开始实用化。传感器网络化的目标就是采用标准的网络协议，同时采用模块化结构将传感器和网络技术有机地结合起来，实现信息交流和技术维护。

【小思考】

举例说明我们日常生活中涉及到的传感器?

1.2　检测技术理论基础

自古以来，检测技术就早已渗透到人类的生产活动和日常生活的各个方面，如计时、产品的质量监控等，在科学技术高度发达的今天，人类已进入瞬息万变的信息时代，人们在从事工业生产和科学实验等活动中，越来越需要对各类信息资源进行有效地开发、获取、传输和处理。我们知道，传感器是感知、获取检测信息的窗口，如何有效地利用传感器实

现各种参数的自动检查和精确测量，则是整个自动控制系统的基础。为了更好地掌握传感器的相关知识，需要对检测技术的基本概念，基本测量方法，检测系统的组成，测量误差及数据处理等方面的理论及工程应用进行学习和研究，只有了解和掌握了这些基本理论，才能更有效地完成检测任务。

1.2.1　检测技术

科学技术的发展与检测技术的发展是密切相关的，现代化的检测手段所具有的可能性在很大程度上决定了科学技术的发展水平。检测技术达到的水平越高，则科学技术就愈为深广。另一方面，科学技术的进步又为检测技术提供了新的发展方向和有力保证。

检测技术是以研究检测系统中的信息提取、信息转换以及信息处理的理论与技术为主要内容的一门应用技术学科。

检测技术主要研究被测量的测量原理、测量方法、检测系统和数据处理等方面的内容。

测量原理是指采用什么样的原理去测量被测量。不同性质的被测量要采用不同的原理去测量，测量同一性质的被测量也可采用不同测量原理。测量原理决定后，就要考虑用什么方法去测量，这就是我们所要研究的测量方法。确定了被测量的测量原理和测量方法后，就要设计或选用装置组成一个自动检测系统。有了已标定过的检测系统，就可以进行实际的检测工作。在实际检测中得到的数据必须进行误差分析和处理，才能得到正确可信的检测结果。

1.2.2　检测方法

1. 测量□

测量是检测技术的重要组成部分，是以确定被测对象量值为目的的一系列操作。测量能够帮助人们获得客观事物定性的认识及定量的信息，寻找并发现客观事物发展的规律。在工业现场，测量更进一步的目的是利用测量所获得的信息来控制某一生产过程，通常这种控制作用是与检测系统紧密相关的。

测量过程实质上是一个比较过程，是一种把物理参数变换成具有意义的数字的过程，也就是说，测量是将被测量与同种性质的标准量进行比较，从而确定被测量对标准量的倍数。它可由下式表示：

$$x = nu \tag{1-13}$$

式中　x—— 被测量值；

u—— 标准量，即测量单位；

n—— 数值(比值)，含有测量误差。

由测量所获得的被测量的量值称为测量结果。测量结果可用一定的数值表示，也可以用一条曲线或某种图形表示。但无论其表现形式如何，测量结果应包括数值和测量单位两部分。更为准确地，测量结果还应包括误差部分。

2. 测量方法

测量方法，就是测量时所采取的具体方法。测量方法对检测系统是十分重要的，它直接关系到检测任务是否能够顺利完成。因此需针对不同的检测目的和具体情况进行分析，

然后找出切实可行的测量方法，再根据测量方法选择合适的检测技术工具，组成一个完整的检测系统，进行实际测量。对于测量方法，从不同的角度出发，可有不同的分类方法。根据测量手段分类，有：直接测量、间接测量和组合测量；根据测量方式分类，有：偏差式测量、零位式测量和微差式测量；根据测量的精度分类，有：等精度测量和非等精度测量；根据被测量变化情况分类，有：静态测量和动态测量；根据敏感元件是否与被测介质接触分类，有：接触测量和非接触测量等。

1) 直接测量、间接测量和组合测量

(1) 直接测量

在使用仪表进行测量时，对仪表读数不需要经过任何运算，就能直接表示测量所需要的结果，称为直接测量。例如，用磁电式电流表测量电路的电流，用弹簧管式压力表测量锅炉的压力等就是直接测量。直接测量的优点是测量过程简单而迅速，缺点是测量精度不容易做到很高，这种测量方法在工程上被广泛采用。

(2) 间接测量

有的被测量无法或不便于直接测量，这就要求在使用仪表进行测量时，首先对与被测物理量有确定函数关系的几个量进行测量，然后将测量值代入函数关系式，经过计算得到所需的结果，这种方法称为间接测量。例如，要测量某长方体的密度ρ，其单位为$\mathrm{kg/m^3}$，显然无法直接获得具有这种单位的量值，但是可以先测出长方体的长、宽和高，即a、b、c(单位为m)及其质量m(单位为kg)，然后根据下式求得密度：

$$\rho = \frac{m}{abc}\ (\mathrm{kg/m^3}) \tag{1-14}$$

间接测量比直接测量所需要测量的量要多，而且计算过程复杂，引起误差的因素也较多，但如果对误差进行分析并选择和确定优化的测量方法，在比较理想的条件下进行间接测量，测量结果的精度不一定低，有时还可得到较高的测量精度。间接测量一般用于不方便直接测量或者缺乏直接测量手段的场合。

(3) 组合测量(又称联立测量)

在应用仪表进行测量时，若被测物理量必须经过求解联立方程组，才能得到最后结果，则称这样的测量为组合测量。在进行组合测量时，一般需要改变测试条件，才能获得一组联立方程所需要的数据。

组合测量是一种特殊的精密测量方法，操作手续较复杂，花费时间很长，一般适用于科学实验或特殊场合。

2) 偏差式测量、零位式测量与微差式测量

用仪表指针的位移(即偏差)决定被测量的量值，这种测量方法称为偏差式测量。应用偏差式测量时，仪表刻度事先用标准器具标定。在测量时，输入被测量，按照仪表指针标识在标尺上的示值，决定被测量的数值。这种方法测量过程比较简单、迅速，但测量结果精度较低。

零位式测量是用指零仪表的零位指示检测测量系统的平衡状态，在测量系统平衡时，用已知的标准量决定被测量的量值的测量方法。应用这种测量方法进行测量时，已知标准量直接与被测量直接相比较，已知量应连续可调，指零仪表指零时，被测量与已知标准量相等。例如天平、电位差计等。零位式测量的优点是可以获得比较高的测量精度，但测量

过程比较复杂，测量时要进行平衡操作，耗时较长，不适用于测量快速变化的信号。

微差式测量是综合了偏差式测量与零位式测量的优点而提出的一种测量方法。它将被测量与已知的标准量相比较，取得差值后，再用偏差法测得此差值。故这种方法的优点是反应快，而且测量精度高，特别适用于在线控制参数的测量。

3) 等精度测量与非等精度测量

在整个测量过程中，若影响和决定测量精度的全部因素(条件)始终保持不变，如由同一个测量者，用同一台仪器，用同样的方法，在同样的环境条件下，对同一被测量进行多次重复测量，称为等精度测量。在实际中，很难做到这些因素(条件)全部始终保持不变，所以一般情况下只是近似地认为是等精度测量。用不同精度的仪表或不同的测量方法，或在环境条件相差很大的情况下对同一被测量进行多次重复测量称为非等精度测量。

4) 静态测量与动态测量

被测量在测量过程中认为是固定不变的，这种测量称为静态测量。静态测量不需要考虑时间因素对测量的影响。

若被测量在测量过程中是随时间不断变化的，这种测量称为动态测量。

在实际测量过程中，一定要从测量任务的具体情况出发，经过认真的分析后，再决定选用哪种测量方法。

1.2.3　检测系统

“检测系统”这一概念是传感技术发展到一定阶段的产物。在工程实际中，需要有传感器与多台测量仪表有机地组合起来，构成一个整体，才能完成信号的检测，这样便形成了检测系统。随着计算机技术及信息处理技术的不断发展，检测系统所涉及的内容也不断得以充实。在现代化的生产过程中，过程参数的检测都是自动进行的，即检测任务是由检测系统自动完成的，因此研究和掌握检测系统的构成及原理十分必要。

1. 检测系统的构成

检测系统是传感器与测量仪表、变换装置等的有机组合。如图 1.17 所示为检测系统的原理结构框图。

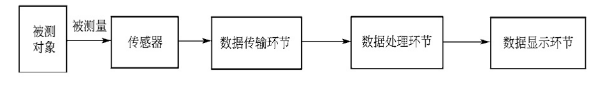


图 1.17　检测系统的原理结构框图

系统中的传感器是感受被测量的大小并输出相对应的可用输出信号的器件或装置。数据传输环节用来传输数据。当检测系统的几个功能环节独立地分隔开的时候，则必须由一个地方向另一个地方传输数据，数据传输环节就是完成这种传输功能。

数据处理环节是将传感器的输出信号进行处理和变换。如对信号进行放大、运算、滤波、线性化、数模(D/A)或模数(A/D)转换，转换成另一种参数信号或某种标准化的统一信号等，使其输出信号便于显示、记录，也可与计算机系统连接，以便对测量信号进行信息处理或用于系统的自动控制。

数据显示环节将被测量信息变成人感官能接受的形式，以达到监视、控制或分析的目的。测量结果可以采用模拟显示，也可以采用数字显示，并可以由记录装置进行自动记录或由打印机将数据打印出来。

2. 开环检测系统与闭环检测系统

1) 开环检测系统

开环测量系统全部信息变换只沿着一个方向进行，如图 1.18 所示。

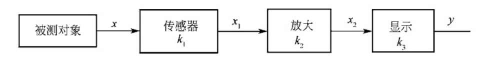


图 1.18　开环检测系统

图中，x 为输入量，y 为输出量，k_1、k_2、k_3 为各个环节的传递系数。输入输出关系为

$$y = k_1 k_2 k_3 x \tag{1-15}$$

采用开环方式构成的测量系统，结构较简单，但各环节特性的变化都会造成测量误差。

2) 闭环检测系统

闭环检测系统有两条通道，一条为正向通道，另一条为反馈通道，其结构如图 1.19 所示。

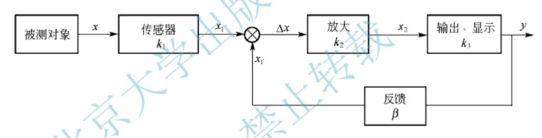


图 1.19　闭环检测系统

图中，Δx 为正向通道的输入量，β 为反馈环节的传递系数，x_f 为反馈量，正向通道的总传递系数 $k = k_2 k_3$。由图 1.19 可知：

$$\Delta x = x_1 - x_f \tag{1-16}$$

$$x_f = \beta y \tag{1-17}$$

$$y = k\Delta x = k(x_1 - x_f) = kx_1 - k\beta y \tag{1-18}$$

$$y = \frac{k}{1+k\beta}x_1 = \frac{1}{\frac{1}{k}+\beta}x_1 \tag{1-19}$$

当 k>>1 时，则

$$y \approx \frac{1}{\beta}x_1 \tag{1-20}$$

系统的输入输出关系为

$$y = \frac{kk_1}{1+k\beta}x \approx \frac{k_1}{\beta}x \tag{1-21}$$

显然，这时整个系统的输入输出关系由反馈环节的特性决定，放大器等环节特性的变化不会造成测量误差，或者说造成的误差很小。

根据以上分析可知，在构成检测系统时，应将开环系统与闭环系统有机地组合在一起加以应用，才能达到所期望的目的。

1.2.4　测量误差及数据处理

1. 测量误差

测量的目的是希望通过测量获取被测量的真实值。但在实际测量过程中，由于种种原因，都会造成被测参数的测量值与真实值不一致，两者不一致程度用测量误差表示。

误差就是测量值与真实值之间的差值，它反映了测量的精度。

随着科学技术的发展，人们对测量精度的要求越来越高，可以说测量工作的价值就取决于测量的精度。当测量误差超过一定限度时，测量工作和测量结果就失去了意义，甚至会给工作带来危害。因此，对测量误差的分析和控制就成为衡量测量技术水平乃至科学技术水平的一个重要方面。但是由于误差存在的必然性和普遍性，人们只能将误差控制在尽可能小的范围内，而不能完全消除它。

另一方面，测量的可靠性也至关重要，不同场合、不同系统对测量结果可靠性的要求也不同。因此，测量的精度及可靠性等性能指标一定要与具体测量的目的和要求相联系、相适应。

1) 测量误差的表示方法

测量误差的表示方法有多种，含义及实际应用各不相同，主要有绝对误差和相对误差两种表示法。

绝对误差表示测量值与被测量真实值(真值)之间的差值，即

$$\Delta = x - A \tag{1-22}$$

式中　Δ—— 绝对误差；

x—— 测量值；

A—— 真实值。

对测量值进行修正时，要用到绝对误差。修正值是与绝对误差大小相等、符号相反的值，实际值等于测量值加上修正值。修正值给出的方式，可以是具体的数值，也可以是一条曲线或公式。

绝对误差不能作为测量精度的尺度。例如，在测量温度时，如绝对误差 Δ=1℃，对体温测量来说是不允许的，但对于测量锅炉的炉温来说却是精度很高的测量结果。因此，在很多场合常用相对误差来代替绝对误差表示测量结果，这样可以比较客观地反映测量的准确性。在实际中，相对误差有以下表示形式：

（1）实际相对误差 γ_A。实际相对误差 γ_A 定义为

$$\gamma_A = \frac{\Delta}{A} \times 100\% \tag{1-23}$$

式中　γ_A——相对误差，一般用百分数表示；

Δ——绝对误差；

A——真实值。

（2）示值(标称)相对误差γ_x。由于被测量的真实值A无法知道，实际测量时常用精度高一级标准器具所显示的测量值x来代替真实值A进行计算，这个相对误差称为示值(标称)相对误差，即

$$\gamma_x = \frac{\Delta}{x} \times 100\% \tag{1-24}$$

（3）引用(满度)相对误差。引用(满度)相对误差通常称为引用(满度)误差。它是指测量仪表中相对仪表满量程的一种相对误差，也用百分数表示，即

$$r_m = \frac{\Delta}{\text{测量范围上限} - \text{测量范围下限}} = 100\% \tag{1-25}$$

式中　γ_m—— 引用误差；

Δ—— 绝对误差。

传感器的精度等级 S 是根据引用误差γ_m来确定的。

2) 误差的分类

(1) 根据测量数据中的误差所呈现的规律，将误差分为三种，即系统误差、随机误差和粗大误差。

① 系统误差(简称系差)

在一定的条件下，对同一被测量进行多次重复测量，如果误差按照一定的规律变化，则把这种误差称为系统误差。这里所谓的变化规律，是指该误差可能是定值(常量)，或累进性变化(逐渐增加或逐渐减少)或周期性变化等。

系统误差决定了测量的准确度，系统误差越小，测量结果越准确，故系统误差说明了测量结果偏离被测量真值的程度。由于系统误差是有规律性的，因此可以通过实验或引入修正值的方法一次修正给以消除。

② 随机误差(简称随差，又称偶然误差)

由于大量偶然因素的影响而引起的测量误差称为随机误差。对同一被测量进行多次重复测量时，随机误差的绝对值和符号将不可预知地随机变化，但总体上服从一定的统计规律。

引起随机误差的原因很多，且大多难以控制，所以对于随机误差不能用简单的修正值法来修正，只能通过概率和数理统计的方法去估计它出现的可能性的大小。

随机误差决定了测量的精密度。随机误差越小，测量结果的精密度越高。如果一个测量数据的准确度和精密度都很高，就称此测量的精确度很高，其测量误差也一定是很小的。

③ 粗大误差(简称粗差，又称疏忽误差)

在一定测量条件下，测量值明显偏离实际真实值所形成的误差称为粗大误差。确认含有粗大误差的测量值称为坏值。对于粗大误差，首先应设法判断是否存在，然后将坏值剔除，因为坏值不能反映被测量的真实结果。

(2) 按使用条件分基本误差和附加误差

基本误差是指仪表在规定的标准条件下所具有的误差。标准条件一般指检测系统在标定刻度时所保持的电源电压(220±5)V、电网频率(50±2)Hz、环境温度(20±5)℃、湿度(65%±5%)RH。如果某台仪表在这个条件下工作，则该仪表所具有的误差为基本误差。测量仪表的精度等级就是由基本误差决定的。

附加误差是指当仪表的使用条件偏离标准条件时出现的误差。例如，温度附加误差、

频率附加误差、电源电压波动附加误差等。实际应用时，这些附加误差应叠加到基本误差上去。

(3) 按测量手段分工具误差和方法误差

工具误差是指由于测量工具本身不完善引起的误差，而方法误差则是指测量方法不精确、理论依据不严密及对被测量定义不明确等因素所产生的误差，有时也称理论误差。

2. 测量数据的估计和处理

从工程测量实践可知，测量数据中含有系统误差和随机误差，有时还会含有粗大误差。它们的性质不同，对测量结果的影响及处理方法也不同。在测量中，对测量数据进行处理时，首先判断测量数据中是否含有粗大误差，如果有，则必须加以剔除。再看数据中是否存在系统误差，对系统误差可设法消除或加以修正。对排除了系统误差和粗大误差的测量数据，则利用随机误差性质进行处理。总之，对于不同情况的测量数据，首先要加以分析研究，判断情况，分别处理，再经综合整理以得出合乎科学性的结果。

1) 随机误差的统计处理

在测量中，当系统误差已设法消除或减小到可以忽略的程度时，如果测量数据仍有不稳定的现象，说明存在随机误差。对于随机误差可以采用概率数理统计的方法来研究其规律、处理测量数据。随机误差处理的任务就是从随机数据中求出最接近真值的值(或称最佳估计值)，对数据精密度的高低(或称可信程度)进行评定并给出测量结果。

(1) 随机误差的分布

随机误差的分布可以在大量重复测量数据的基础上总结出来，由此得出统计规律。测量实践表明，当测量次数足够多时，测量过程中产生的误差服从正态分布规律。概率密度函数为

$$y = f(\delta) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}} \qquad (1\text{-}26)$$

式中　y——概率密度；

σ——标准误差(均方根准误差)；

δ——随机误差。

正态分布规律曲线为一条钟形的曲线，如图 1.20 所示，说明在 δ=0 附近区域内具有最大概率。

由图 1.20 可以发现随机误差分布规律具有以下特点：

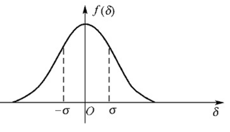


图 1.20　正态分布曲线

① 集中性。绝对值小的随机误差出现的概率大于绝对值大的随机误差出现的概率，在 $\delta = 0$ 处附近区域内出现的概率最大。

② 有限性。随机误差的绝对值不会超出一定界限。

③ 对称性。测量次数 n 很大时，绝对值相等，符号相反的随机误差出现的概率相等。

④ 抵偿性。当测量次数趋近于无穷大时，随机误差的代数和将趋近于零。

由于随机误差的出现是符合正态分布曲线的，因此它的出现概率就是该曲线下所包围

的面积，该面积是全部随机误差出现的概率 P 之和，也就是应该等于 1，即

$$P=\int_{-\infty}^{+\infty} y\mathrm{d}\delta=\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{+\infty}\mathrm{e}^{\frac{\delta^2}{2\sigma^2}}\mathrm{d}\delta=1 \tag{1-27}$$

(2) 随机误差的评价指标

随机误差是按正态分布规律出现的，具有统计意义，通常以测量数据的算术平均值 $\bar{x}$ 和均方根误差 σ 作为评价指标。

① 算术平均值

在实际测量时，真值 A 一般无法得到。所以只能从一系列测量值 x_i 中找一个接近真值 A 的数值作为测量结果，这个值就是算术平均值 $\bar{x}$。因为如果随机误差服从正态分布，则算术平均值处随机误差的概率密度最大，如对被测量进行 n 次等精度测量，

得到 n 个测量值 x_1， x_2，…， x_n，则它们的算术平均值为

$$\bar{x}=\frac{1}{n}(x_1+x_2+\cdots+x_n)=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}x_i \tag{1-28}$$

可以证明，随着测量次数 n 的增多，算术平均值 $\bar{x}$ 越来越接近真值 A，当 n 无限大时，测量值的算术平均值就是真值。所以在各测量值中算术平均值 $\bar{x}$ 是最可信赖的，将它作为被测量实际的真值(即最佳估计值)是可靠而且合理的。

② 标准误差(又称标准偏差、均方根误差)

上述的算术平均值是反映随机误差的分布中心，而标准误差则反映随机误差的分布范围。标准误差愈大，测量数据的分散范围也愈大，所以标准误差 σ 可以描述测量数据和测量结果的精度，是评价随机误差的重要指标。图 1.21 为三种不同 σ 的正态分布曲线。由图可见：σ 愈小，分布曲线愈陡，说明随机变量的分散性小，测量精度高；反之，σ 愈大，分布曲线愈平坦，随机变量的分散性也大，则精度也低。

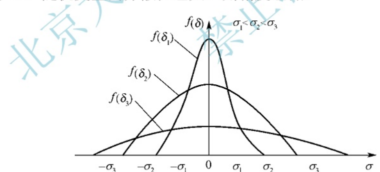


图 1.21　三种不同 σ 的正态分布曲线

由于在实际中用算术平均值 $\bar{x}$ 来代替真值 A，所以通常通过残余误差（简称残差，又称剩余误差)来求得标准误差 σ。所谓残差，是指测量值与该被测量的算术平均值之差，用 v_i 表示，即 $v_i=x_i-\bar{x}$。

设对某一被测量进行了 n 次等精度测量，则标准误差 σ 可表示为

$$\sigma=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2}{n-1}}=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}v_i^2}{n-1}} \tag{1-29}$$

式(1-29)称为贝赛尔(Bessel)公式。式中($n-1$)称为自由度。

因为残差 v_i 有一个重要特性，即

$$\sum_{i=1}^{n} v_i \equiv 0 \tag{1-30}$$

所以已知$(n-1)$个残差，则余下的一个残差就完全确定了，也就是说，在 n 个 v_i 值中存在着一个约束条件，故常把$(n-1)$称为自由度。

当 $n=1$ 时，σ 的值不定，所以一次测量的数据是不可靠的。需要指出的是，标准误差 σ 并不是一个具体的误差，σ 数值的大小仅代表一组测量值中的每一个测量值的精度，但在研究测量精度时，不仅要了解各测量值的精度，更重要的是要知道测量结果算术平均值 $\bar{x}$ 的精度。我们已经讨论过，当测量次数 n 无限增加时，算术平均值趋近于真值 A。但由于测量次数总是有限的，因此算术平均值也存在一定的误差。测量次数越少，算术平均值 $\bar{x}$ 的误差越大。但算术平均值 $\bar{x}$ 的误差总是比各测量值的误差小。

设在等精度条件下，对某一被测量分成 m 组分别做 n 次测量，一般地，每组的标准误差 σ 不会相同，每组的“n 次测量”所得的算术平均值 $\bar{x}_1$，$\bar{x}_2$，…，$\bar{x}_m$ 也会各不相同，但都是围绕着真值 A 作上下波动，而且波动的范围肯定比单次测量波动的范围要小，即测量的精度要高。随着测量次数的增多，平均值将收敛于真值 A。因此，将多次测量的算术平均值作为测量结果时，其精度参数也用算术平均值的标准误差 $\bar{\sigma}$ 来表示，即

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \tag{1-31}$$

式(1-31)给出了算术平均值的标准误差与单次测量标准误差之间的关系，当 $n=4$ 时，测量的算术平均值的标准误差是单次测量标准误差的 $1/2$，其减小量是按 $1/\sqrt{n}$ 的速度进行的，经分析可知，$n>10$ 以后，随着 n 的增加，$\bar{\sigma}$ 的减小相当缓慢，因此实际测量工作中，一般以 $10 \leqslant n \leqslant 20$ 为宜，过多的重复测量，不仅会增大工作量，也难于保证测量条件的稳定，而算术平均值的标准误差又减小缓慢，再想提高测量精度就需要寻找另外的途径。

由以上讨论可知，对一个被测量的测量结果，可用其算术平均值 $\bar{x}$ 作为被测量的最可信值(真值的最佳估计值)，一般用下式表示随机误差的影响，即

$$x = \bar{x} \pm Z\bar{\sigma} \tag{1-32}$$

式中　Z 称为置信系数，一般取 1～3，可以证明，这时概率 P 如下：

$$\begin{cases} Z=1 & P=68.26\% \\ Z=2 & P=95.44\% \\ Z=3 & P=99.73\% \end{cases} \tag{1-33}$$

式(1-33)表明，当 $Z=1$，2，3 时，随机误差在 $\delta=\pm\sigma$、$\delta=\pm2\sigma$ 和 $\delta=\pm3\sigma$ 范围内的概率分别为 68.26%、95.44%和 99.73%，如图 1.22 所示，故评定随机误差时一般以 $\pm3\sigma$ 为极限误差，如某项测量值的残差超出 $\pm3\sigma$，则认为此项测量值中含有粗大误差，数据处理时应舍去。

2) 系统误差的检查及消除

发现系统误差一般比较困难，下面只介绍几种发现系统误差的一般方法。

(1) 实验对比法

这种方法是通过改变产生系统误差的条件，进行不同条件的测量，来发现系统误差的，此种方法适用于发现固定的系统误差。

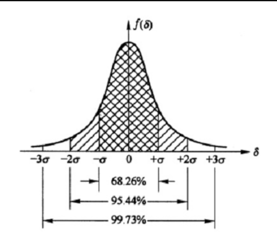


图 1.22　置信概率与置信区间

(2) 残余误差法

这种方法是根据测量值的残余误差的大小和符号的变化规律，直接由误差数据或误差曲线来判断有无系统误差。这种方法主要适用于发现有规律变化的系统误差。把残余误差按照测量值先后顺序作图，如图 1.23 所示。图(a)中残余误差大体上是正负相同，且无明显地变化规律，则无根据怀疑存在系统误差；图(b)中残余误差有规律地递增(或递减)，表明存在线性变化的系统误差；图(c)中残余误差大小和符号大体呈周期性变化，可以认为有周期性系统误差；图(d)中残余误差变化规律较复杂，则怀疑同时存在线性系统误差和周期性系统误差。

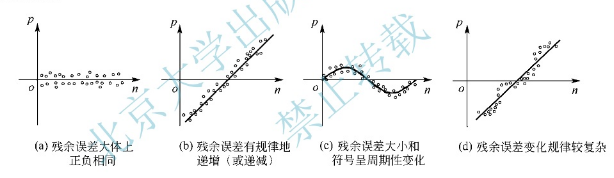


图 1.23　残余误差的变化规律

(3) 理论计算法

通过现有的相关准则进行理论计算，也可以检验测量数据中是否含有系统误差。包括马利科夫准则、阿卑—赫梅特(Abbe—Helmert)准则，此处不在详细阐述。

3) 粗大误差的判别

包括拉依达准则(3σ 准则)、肖维勒准则和格拉布斯(Grubbs)准则。

4) 测量数据的处理

对一项测量任务，当完成多次测量之后，为了得到精密的测量结果，需按下列步骤对测量数据进行处理：

(1) 利用修正值等方法，对测量值进行修正，减小恒值系统误差的影响。

(2) 将一系列等精度测量读数 x_i ($i=1$，2，…，n)按先后顺序列成表格(在测量时应尽可能消除系统误差)。

(3) 计算测量读数 x_i 的算术平均值 $\bar{x}$ 。

(4) 在每个测量读数 x_i 旁列出相应的残余误差 v_i。

(5) 检查 $\sum_{i=1}^{n} v_i \equiv 0$ 的条件是否满足，若不满足，说明计算有误，需重新计算。

(6) 在每项残余误差旁列出 v_i^2，然后根据式(1-29)求出标准误差 σ；

(7) 依照已知条件和实际要求，可根据拉依达准则(3σ 准则)检查是否有 $|v_i| > 3\sigma$ 的测量值；或根据肖维勒准则，检查是否有 $|v_i| > Z_c\sigma$ 的测量值；或根据格拉布斯准则，检查是否有 $|v_i| > G\sigma$ 的测量值；如果有，则应认为该测量值为坏值，舍去此值，然后重复完成(3)～(7)的步骤，直到没有坏值为止。

(8) 判断有无变值系统误差。可用残余误差法或马利科夫准则及阿卑—赫梅特准则判别有无累进性和周期性系差。注意这里用到的 v_i 和 σ 值，均应当采用无坏值时的数据。

若判断存在累进性系统误差或周期性系统误差或二者同时存在，原则上，全部测量数据均应舍弃不用。

(9) 由式(1-31)计算测量值的算术平均值的标准误差

(10) 根据实际要求，由式(1-32)写出最后测量结果。

【例】 对某电压进行了 16 次等精度测量，测量数据 x_i 已经过修正，列于表 1-2 中。要求给出包括误差在内的测量结果表达式。

表 1-2　某电压等精度实验测量数据

n	x_i	v_i	v_i^2	n'	x_i'	v_i'	$(v_i')^2$
1	205.30	0	0	1	205.30	+0.09	0.0081
2	204.94	-0.36	0.1296	2	204.94	-0.27	0.0729
3	205.63	+0.33	0.1089	3	205.63	+0.42	0.1764
4	205.24	-0.06	0.0036	4	205.24	+0.03	0.0009
5	204.97	-0.33	0.1089	5	204.97	-0.24	0.0576
6	206.65	+1.35	1.8225	—	—	—	—
7	205.36	+0.06	0.0036	6	205.36	+0.15	0.0225
8	205.16	-0.14	0.0196	7	205.16	-0.05	0.0025
9	205.71	+0.41	0.1681	8	205.71	+0.50	0.25
10	204.70	-0.60	0.3600	9	204.70	-0.51	0.2601
11	204.86	-0.44	0.1936	10	204.86	-0.35	0.1225
12	205.35	+0.05	0.0025	11	205.35	+0.14	0.0196
13	205.21	-0.09	0.0081	12	205.21	0	0
14	205.19	-0.11	0.0121	13	205.19	-0.02	0.0004
15	205.21	-0.09	0.0081	14	205.21	0	0
16	205.32	+0.02	0.0004	15	205.32	+0.11	0.0121
计算值	$\overline{x_i}$ =205.30	$\sum v_i = 0$	$\sum v_i^2 = 2.9496$	计算值	$\overline{x_i'} = 205.21$	$\sum v_i' = 0$	$\sum (v_i')^2 = 1.0056$

【解】

(1) 求出算术平均值　$\overline{x_i}$=205.30(V)

(2) 计算相应的残余误差，列于表中(第 3 列)，检查 $\sum_{i=1}^{n} v_i \equiv 0$，计算正确。

(3) 计算标准误差 σ：

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n} v_i^2} = 0.4434$$

(4) 检查测量数据中有无坏值。本例采用拉依达准则(3σ 准则)，检查是否有 $|v_i'| > 3\sigma'$ 的测量值。经检查，第 6 个数据 $|v_6| = 1.35 > 3\sigma = 1.3302$，应将此值对应的测量值 $x_i = 206.65$ 视为坏值加以剔除，现剩下 15 个数据。

(5) 重新计算剩余的 15 个数据的平均值：

$\overline{x_i'}$ ＝205.21(V)

(6) 重新计算各残差 v_i' 列于表中。

(7) 重新计算标准误差：

$$\sigma' = \sqrt{\frac{1}{14}\sum_{i=1}^{n} v_i'^2} = 0.27$$

(8) 再根据拉依达准则检查有无坏值。经检查，剩余 15 个数据均有 $|v_i'|$ ＜3 σ' ＝0.81，说明这些数据中已不再有坏值。

(9) 由 σ' 求出去掉坏值后新数据的算术平均值的标准误差，即

$$\overline{\sigma'} = \frac{\sigma'}{\sqrt{n'}} = \frac{0.27}{\sqrt{15}} \approx 0.07$$

(10) 写出测量结果表达式：

取置信系数 Z =1，则 $x = \overline{x'} \pm \overline{\sigma'} = 205.21 \pm 0.07$ (V)，实际测量结果出现在此区间的概率为 68.26%。

取置信系数 Z =3，则 $x = \overline{x'} \pm 3\overline{\sigma'} = 205.21 \pm 0.21$ (V)，实际测量结果出现在此区间的概率为 99.73%。

5) 误差的合成与分配

以上主要是针对直接测量的误差分析，在直接测量中，测量误差就是测量值的误差。而对于间接测量，则是通过测量值与被测量之间的函数关系，经过计算得到被测量的数值，所以间接测量的误差是各个测量值误差的函数。

一个测量系统或一个传感器都是由若干部分组成的，设各环节分别为 x_1，x_2，…，x_n，系统总的输入输出之间的函数关系为 $y = f(x_1, x_2, \cdots, x_n)$，而各部分又都存在误差，因此会影响测量系统或传感器总的误差，这类误差的分析也可归纳到间接测量的误差分析。在间接测量中，已知各测量值的误差(或局部误差)，求总的误差，称为误差合成(也称误差综合)；反之，确定了总的误差后，计算各环节(或各部分)具有多大误差才能保证总的误差值不超过规定值，称为误差的分配。在传感器和检测系统的设计时经常用到误差的合成与误差的分配。

(1) 误差的合成

在实际测量中，当系统误差远大于随机误差的影响，随机误差可忽略不计时，基本上可按系统误差的合成来处理，但这种情况一般较少。当系统误差较小或已修正时，则可按随机误差合成来处理。最常见的是系统误差和随机误差的影响差不多，二者均不可忽略，此时，误差的合成可根据具体情况，分别按不同的方法处理。

对不同类型的误差应采取不同的合成方法，对同类型的误差，由于误差分布不同，合成的方法也不尽相同，故在误差合成时，要首先确定单项误差的分布规律。对于随机误差，绝大多数情况下是遵循正态分布的。

(2) 误差的分配

如果说由各测量值的误差合成总误差是误差传播的正向过程，那么给定总误差后，如何将这个总误差分配给各环节，即对各环节误差应提出什么要求，就可以说是误差传播的反向过程。这种制定误差分配方案的工作是经常会遇到的，但是当总误差给定后，由于系统存在若干个环节，所以从理论上来说误差分配方案可以有无穷多个。因此只可能在某些前提下进行分配，下面介绍几种常见的误差分配原则。

① 等精度分配。等精度分配是指分配给各环节的误差彼此相同。这种分配多用于各环节性质相同(量纲相同)，误差大小相近的情况。当然这样分配后，也可能不完全合理，可根据情况进行进一步调整，以利于实现。

② 等作用分配。等作用分配是指分配给各环节的误差在数值上虽然不一定相等，但它们对测量误差总的作用或总的影响是相同的。

③ 按主要误差进行分配。当各环节误差中的某一项误差特别大时，若其他项对误差总的影响很小(小于等于测量结果总的标准偏差的 1/3～1/10)，这时可以不考虑次要环节的误差分配问题，只要保证主要环节的误差小于总的误差即可。

主要环节的误差也可以是若干项，这时可把误差在这几个主要误差项中分配，对系统影响较小的次要误差项，则可不予考虑或酌情较小分配误差的比例。

【小思考】

1. 如何理解传感器与检测的关系？

2. 传感器在检测系统中的地位怎样？

本 章 小 结

在科学技术高速发展的今天，传感器作为自动化及自动控制系统重要的组成部分，越来越起着举足轻重的作用。

传感器是利用物理、化学、生物等学科的某些效应或原理，按照一定制造工艺研制出来的一种装置，一般由敏感元件、转换元件及测量电路组成。按某一原理设计的传感器可以测量多种参数(主要是非电量)，而有时一种非电量又可以采用几种不同的传感器来测量。传感器种类繁多，性能特点各有所长，应用领域十分广泛。

传感器的特性主要是指传感器的输入与输出之间的关系，根据输入信号是否随时间变

化，传感器的基本特性分为静态特性和动态特性。其中，精度、线性度、灵敏度、稳定性等是静态特性中非常重要的性能指标。研究传感器的特性就是为了使传感器尽可能准确、真实地反映被测量，同时对传感器的各项性能做出客观评价，从而为实际应用提供重要的选择依据。在实际工作中，需要根据系统的具体要求选择使用适当的传感器。

传感器是实现检测的主要装置，是构成检测系统的最前端环节。

误差理论是检测系统的理论基础。关于系统误差和随机误差的分析以及粗大误差的判别是其中的核心内容，而误差的合成与分配在实际中得到广泛应用。

目前传感器技术发展迅速，主要发展趋势是新型化、集成化、多功能化及智能化。

思考题与习题

1-1 填空题

(1) 一般传感器由（　　）、（　　）和（　　）组成。

(2) 传感器的基本特性有（　　）和（　　）。

(3) 误差的表示方法有（　　）和（　　）。

(4) 随机误差的特点是（　　）、（　　）、（　　）和（　　）。

1-2 传感器的分类方法有哪些？

1-3 什么是传感器的静态特性和动态特性？研究静态及动态特性有何意义？

1-4 衡量传感器静态特性的主要性能参数有哪些？

1-5 在检测系统中，常用的测量方法有哪些？

1-6 开环检测系统和闭环检测系统各有何特点？

1-7 什么是测量误差？研究测量误差的意义是什么？

1-8 什么是系统误差和随机误差？它们有何区别与联系？

1-9 什么是标准误差？如何理解其数值大小的含义？

1-10 如果一块精度等级为 1.0 级 100mA 的电流表，其最大误差在 50mA 处为 1.4mA，试问这块电流表是否合格？

1-11 被测电压的实际值为 10V，现有 150V，0.5 级和 15V，2.5 级两种电压表，问选择哪一电压表误差较小？

1-12 已知单次测量的标准误差 $\sigma=0.12$(单位省略)，试问在不改变测量条件的情况下，使被测量估计值的标准误差达到 0.04，试问需要测量几次？

1-13 对某电流进行了 10 次等精度测量，其测量数据如表 1-3 所示。

表 1-3　对某电流 10 次测量数据表

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

x_i	101.05	100.90	100.90	100.70	100.60	100.50	100.40	100.30	100.35	100.30

试判断测量中是否存在累进性系统误差和周期性系统误差？

1-14 对某一被测量进行了 16 次等精度测量，获得数据如表 1-4 所示。设测量时已消除了系统误差，试判断在该测量数据中是否存在粗大误差？并写出该测量结果的表达形式。

表 1-4　对某被测量 16 次测量数据表

n	1	2	3	4	5	6	7	8
x_i	20.42	20.43	20.40	20.43	20.42	20.43	20.39	20.30
n	9	10	11	12	13	14	15	16
x_i	20.39	20.40	20.43	20.42	20.41	20.39	20.39	20.40

第 2 章　电阻式传感器

【教学目标】

要求了解应变式和压阻式电阻传感器的测量原理，掌握信号测量电路的分析，针对不同类型、不同结构的电阻传感器，学会运用在不同的参数检测中。

【教学要求】

知识要点	能力要求	相关知识
传感器原理	了解，	物理、数学
测量电路	掌握测量电路的分析（单臂、双臂和四臂）	电路、电子
传感器的应用	熟悉和掌握传感器在参数检测中的应用	工程

【导入案例】

在医学上，经常遇到对病人血压的测量，如创血压如动脉压、中心静脉压、肺动脉压、左冠状动脉压多重压力进行检测。由于人体的特殊性和不可随意性，对压力检测的器件必然有特殊的要求，为此研制出了医用压力传感器，如图 1 所示。用于直接获得人体血压生理参数，为临床疾病的诊断、治疗和预后估计提供客观依据。



图 1　医用压力传感器



图 2 称重传感器

在人们的日常生活中，经常看到的电子称、汽车重量的检测、火车用的轨道衡等都属于称重装置，其核心部分就是应变传感器，如图 2 所示。这种称重传感器的敏感元件粘贴的刚体主要采用双梁式或剪切 S 梁结构，拉压输出对称性好，测量精度高，安装使用方便。广泛用于机电结合秤、料斗秤、包装秤等各种侧力、称重系统中。

电阻式传感器是一种应用较早的电参数传感器，它的种类繁多，应用十分广泛，其基本原理是将被测物理量的变化转换成与之有对应关系的电阻值的变化，再经过相应的测量电路后，反映出被测量的变化。

电阻式传感器结构简单、线性和稳定性较好，与相应的测量电路可组成测力、测压、称重、测位移、测加速度、测扭矩、测温度等检测系统，已成为生产过程检测及实现生产自动化不可缺少的手段之一。

本章主要介绍应变片式电阻传感器和压阻式传感器，分别从工作原理、特性特点、测量电路和实际应用等几个方面加以介绍。

2.1　应变式电阻传感器

应变式电阻传感器是利用应变效应原理制成的一种测量微小机械变化量的理想传感器。它具有悠久的历史，但新型应变片仍在不断出现，目前仍广泛应用于测量力、力矩、压力、加速度、重量等参数。

2.1.1　应变效应和工作原理

导体或半导体材料在受到外界力(拉力或压力)作用时，将产生机械变形，机械变形会导致其电阻值变化，这种因形变而使其电阻值发生变化的现象称为“应变效应”。

设有一根电阻丝，如图 2.1 所示，它在未受力时的初始电阻为

$$R=\rho\frac{l}{S} \tag{2-1}$$

式中　ρ —— 电阻丝的电阻率；

l —— 电阻丝的长度；

S —— 电阻丝的截面积。

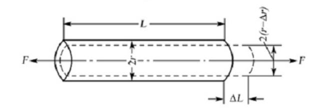


图 2.1　金属丝伸长后几何尺寸变化

设电阻丝在外力 F 的作用下被拉伸(或压缩)，则其 ρ、l、S 均发生变化，变化量分别为 $\mathrm{d}\rho$、$\mathrm{d}l$、$\mathrm{d}S$，电阻值相应变化为 $\mathrm{d}R$，由多元函数微分得

$$\begin{aligned}\mathrm{d}R&=\frac{\partial R}{\partial l}\mathrm{d}l+\frac{\partial R}{\partial S}\mathrm{d}S+\frac{\partial R}{\partial \rho}\mathrm{d}\rho\\&=\frac{\rho}{S}\mathrm{d}l-\frac{\rho}{S^2}\mathrm{d}S+\frac{l}{S}\mathrm{d}\rho\end{aligned} \tag{2-2}$$

用相对变化表示式(2-23)得

$$\frac{\mathrm{d}R}{R}=\frac{\mathrm{d}l}{l}-\frac{\mathrm{d}S}{S}+\frac{\mathrm{d}\rho}{\rho} \tag{2-3}$$

对于半径为 r 的电阻丝，截面面积 $S=\pi r^2$，则有 $\mathrm{d}S=2\pi r dr$，所以 $\mathrm{d}S/S=2\ \ \mathrm{d}r/r$。令电阻丝的轴向(纵向)应变为 $\varepsilon=\mathrm{d}l/l$，径向(横向)应变为 $\mathrm{d}r/r$，则由材料力学泊松定律可知：

$$\frac{dr}{r}=-\mu\left(\frac{dl}{l}\right)=-\mu\varepsilon \tag{2-4}$$

式中，μ 为泊松比。

经整理得

$$\frac{\mathrm{d}R}{R}=\left(1+2\mu\right)\ \ \varepsilon+\frac{\mathrm{d}\rho}{\rho} \tag{2-5}$$

如用增量 ΔR 和 $\Delta\rho$ 表示 $\mathrm{d}R$ 和 $\mathrm{d}\rho$，则式(2-26)也可表示为

$$\frac{\Delta R}{R}=\left(1+2\mu\right)\ \ \varepsilon+\frac{\Delta\rho}{\rho} \tag{2-6}$$

进一步整理得

$$\frac{\Delta R}{R}=\left(1+2\mu+\frac{\Delta\rho/\rho}{\varepsilon}\right)\varepsilon \tag{2-7}$$

设

$$k_0=1+2\mu\ \ +\frac{\Delta\rho/\rho}{\varepsilon} \tag{2-8}$$

这里，k_0 为电阻丝的灵敏系数，即单位应变所引起的电阻的相对变化。由式(2-29)可知，电阻丝的灵敏系数受两个因素的影响：一是 $(1+2\mu)$，它是由电阻丝几何尺寸改变引起的，对某种材料来说，它是常数；另一个是 $\frac{\Delta\rho/\rho}{\varepsilon}$，它是由电阻丝电阻率的改变而引起的，对于金属材料，其值也是常数，但往往比 $(1+2\mu)$ 小很多，可以忽略，故 $k_0\approx 1+2\mu$。

大量实验证明，对于每一种电阻丝，在一定的相对变形范围内，无论受拉或受压，金属材料的灵敏系数将保持不变，即 k_0 值是恒定的。当超出某一范围时，k_0 值将发生变化。通常金属丝的 k_0=1.7～3.6，所以式(2-28)可以表示为

$$\frac{\Delta R}{R}=k_0\varepsilon \tag{2-9}$$

可见，当金属电阻丝受到外界应力的作用时，其电阻的变化与受到应力的大小成正比。

2.1.2　电阻应变片的种类、材料及粘贴

1. 电阻应变片的种类、结构与材料

1) 种类

根据制作材料的不同，电阻应变片通常分为金属电阻应变片和半导体应变片两大类，如前所述，金属电阻应变片就是利用金属电阻的应变效应原理制成的，而半导体应变片则是利用半导体材料的压阻效应原理制成，因此应用半导体应变片的电阻式传感器通常又称为压阻式传感器，关于这部分内容将在 2.3 节中作详细介绍，本节仅介绍金属电阻应变片。

金属电阻应变片分为丝式、箔式和薄膜式。其中金属丝式应变片使用最早、最多，因其制作简单、性能稳定、价格低廉、易于粘贴而被广泛使用。

2) 结构

图 2.2 为金属丝式应变片的典型结构图。由图可知，金属丝式电阻应变片由敏感栅、基底、盖层、粘合层和引线等组成。其中敏感栅是应变片内实现应变——电阻转换的最重要的传感元件，一般采用栅丝直径为 0.015mm～0.05mm。敏感栅的纵向轴线称为应变片轴线，L 为栅长，a 为基宽。根据不同用途，栅长可为 0.2mm～200mm。基底用以保持敏感栅及引线的几何形状和相对位置，并将被测件上的应变迅速准确地传递到敏感栅上，因此基底做得很薄，一般为 0.02mm～0.4mm。盖层起防潮、防腐、防损的作用，用以保护敏感栅。基底和盖层用专门的薄纸制成的称为纸基，用各种粘结剂和有机树脂薄膜制成的称为胶基，现多采用后者。粘结剂将敏感栅、基底及盖层粘结在一起。在使用应变片时也采用粘结剂将应变片与被测件粘牢。引线常用直径为 0.10mm～0.15mm 的镀锡铜线，并与敏感栅两输出端焊接。

金属箔式应变片的基本结构如图 2.3 所示，其敏感栅是由很薄的金属箔片制成，厚度只有约 0.01mm～0.10mm，用光刻、腐蚀等技术制作。箔式应变片的横向部分特别粗，可大大减少横向效应，且敏感栅的粘贴面积大，能更好地随同试件变形。此外与金属丝式应变片相比，金属箔式应变片还具有散热性能好，允许电流大，灵敏度高，寿命长，可制成任意形状，易加工，生产效率高等优点，所以其使用范围日益扩大，已逐渐取代丝式应变片而占主要的地位。但需要注意，制造箔式应变片的电阻值的分散性要比丝式的大，有的能相差几十欧姆，故需要作阻值的调整。

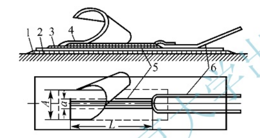


图 2.2　金属丝式应变片的基本结构

1、3—粘合层；　2—基底；　4—盖层；

5—敏感栅；　6—引线；

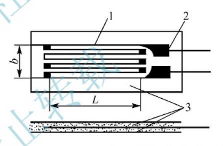


图 2.3　金属箔式应变片的基本结构

1—敏感栅；　2—引线；　3—基底。

对金属电阻应变片敏感栅材料的基本要求是：

① 灵敏系数 k_0 值大，并且在较大应变范围内保持常数。

② 电阻温度系数小。

③ 电阻率大。

④ 机械强度高，且易于拉丝或辗薄。

⑤ 与铜丝的焊接性好，与其他金属的接触热电势小。

表 2-1 给出了几种国产电阻应变片的技术数据。

与丝式和箔式两种传统的金属粘贴式电阻应变片不同，薄膜应变片是采用真空蒸发或真空沉积的方法，将金属敏感材料直接镀制于弹性基片上。相对于金属粘贴式应变片而言，薄膜应变片的应变传递性能得到了极大的改善，几乎无蠕变，并且具有应变灵敏系数高，稳定性好、可靠性高、工作温度范围宽(−100℃～180℃)、使用寿命长、成本低等优点，是一种很有发展前途的新型应变片，目前在实际使用中遇到的主要问题是尚难控制其电阻对

温度和时间的变化关系。

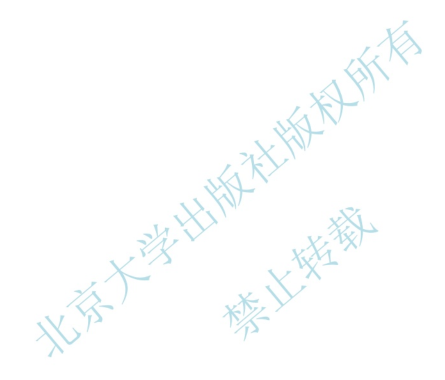


表 2-1　几种国产电阻应变片的技术数据

型　号	形　式	阻值/Ω	灵敏系数 K	线栅尺寸 $(B\times L)$/mm×mm
PZ-17	圆角线栅，纸基	120±0.2	1.95 ～ 2.10	2.8×17
8120	圆角线栅，纸基	118	2.0±1%	2.8×18
PJ-120	圆角线栅，胶基	120	1.9 ～ 2.1	3×12
PJ-320	圆角线栅，胶基	320	2.0 ～ 2.1	11×11
PB-5	箔式	120±0.5	2.0 ～ 2.2	3×5
2×3	箔式	87±0.4%	2.05	2×3
2×1.5	箔式	35±0.4%	2.05	2×1.5

3) 材料

金属电阻应变片常用的敏感栅材料有康铜、镍铬合金、镍铬铝合金、铁铬铝合金、铂、铂钨合金等。常用电阻丝材料及其性能见表 2-2。

表 2-2　常用电阻丝材料及性能

材料名称	成分	灵敏系数 k	在20℃时的电阻率/(μΩ·m)	在0℃～100℃的电阻温度系数/(×10⁻⁶/℃)	最高使用温度/℃	对铜的热电势/(μV·m)	在0℃～100℃时的线膨胀系数/(×10⁻⁶/℃)
康铜	60%Cu 40%Ni	1.9～2.1	0.45～0.52	−20～+20	300(静态) 400(动态)	43	15
镍铬合金	80%Ni 20%Cr	2.1～2.3	0.9～1.1	110～150	450(静态) 800(动态)	3.3	14
镍铬铝合金(6J22，卡玛合金)	74%Ni 20%Cr 3%Al 3%Cr	2.4～2.6	1.24～1.42	−10～+10	450(静态) 800(动态)	3	13.3
镍铬铝合金(6J23)	75Ni 20%Cr 3%Al 2%Cr	2.8	1.24～1.42	−10～+10			

铁铬铝合金	70%Fe 25%Cr 5%Al	1.3～1.5	1.3～1.5	30～40	700(静态) 1000(动态)	2～4	14
铂	100% Pt	4～6	0.09～0.11	3900	800(静态) 1000(动态)	7.6	8.1
铂钨合金	92%Pt 8%W	2.5	0.58	227		6.1	8.3～9.2

2. 电阻应变片的粘贴

电阻应变片用粘合剂粘贴到试件表面上，粘合剂形成的胶层必须准确迅速地将被测试件的应变传到敏感栅上。粘合剂的性能及粘结工艺的质量直接影响着应变片的工作特性，如零漂、蠕变、滞后、灵敏系数、线性以及它们受温度影响的程度。可见，在粘贴时，必须合理选择粘合剂，遵循正确的粘结工艺，保证粘贴质量，这与电阻应变片的测量精度有着极其重要的关系。

选择粘合剂必须适合应变片材料和被试件材料，不仅要求粘结力强，粘结后机械性能可靠，而且粘合层要有足够大的剪切弹性模量，良好的电气绝缘性，蠕变和滞后小，耐湿、耐油、耐老化，动应力测量时耐疲劳等。此外，还要考虑到应变片的工作条件，如温度、相对湿度、稳定性要求、粘贴时间长短的要求以及贴片固化时加热加压的可能性等。

常用的粘合剂类型有硝化纤维素型、氰基丙烯酸型、聚酯树脂型、环氧树脂类和酚醛树脂类等。

粘贴工艺包括被测试件表面处理、贴片位置的确定、贴片干燥固化、贴片质量检查、引线的焊接与固定以及防护与屏蔽等。

2.1.3　电阻应变片的主要特性

1. 灵敏系数

当具有初始电阻值 R 的应变片粘贴于试件表面时，试件受力引起的表面应变，将传递给应变片的敏感栅，使其产生电阻相对变化 $\Delta R/R$。理论和实验表明，在一定应变范围内 $\Delta R/R$ 与 ε_t 关系满足下式：

$$\frac{\Delta R}{R}=K\varepsilon_t \tag{2-10}$$

式中，ε_t 为应变片的轴向应变。

定义 $K=(\Delta R/R)/\varepsilon_t$ 为应变片的灵敏系数。它表示安装在被测试件上的应变在其轴向受到单向应力时，引起的电阻相对变化 $\Delta R/R$ 与其单向应力引起的试件表面轴向应变 ε_t 之比。应变片的灵敏系数 K 值的准确性直接关系到应变测量的精度，其误差大小是衡量应变片质量优劣的重要标志。一般要求 K 值尽量大而稳定。

但必须指出，应变片的灵敏系数 K 并不等于其敏感栅整长电阻丝的灵敏系数 k_0，须通过实验的方法对 K 值重新测定(对同一批产品采样 5%进行标定，然后去其平均值作为这批

产品的灵敏系数，也称标称灵敏系数)，一般情况下，$K < k_0$，这是因为，在单向应力产生应变时，K 除受到敏感栅结构形状、成型工艺、粘结剂和基底性能的影响外，尤其受到栅端圆弧部分横向效应的影响。

2. 横向效应

当将图 2.4 所示的应变片粘贴在被测试件上时，由于其敏感栅是由 n 条长度为 l 的直线段和直线段端部的 $n-1$ 个半径为 r 的半圆圆弧组成，若该应变片承受轴向应力而产生纵向拉应变 ε_x 时，则各直线段的电阻将增加，但在半圆弧段，其受到的纵向应变却非 ε_x，因此产生的电阻的变化就与直线段不相同，最显著地，在 $\theta = \pi/2$ 的圆弧处，除纵向的拉应变外，由泊松关系，还存在横向的负应变 $\varepsilon_y(-\mu\varepsilon_x)$，将造成电阻的减小。因此，敏感栅的半圆弧段受到从 $+\varepsilon_x$ 到 $-\mu\varepsilon_x$ 之间变化的应变，其电阻的变化将小于沿轴向安放的同样长度电阻丝电阻的变化。

综上所述，将直的电阻丝绕成敏感栅后，虽然长度不变，应变状态相同，但由于应变片敏感栅的电阻变化减小，因而其灵敏系数 k 较整长电阻丝的灵敏系数 k_0 小，这种现象称为应变片的横向效应。

为了减小横向效应产生的测量误差，现在一般多采用箔式应变片。

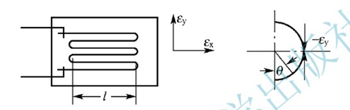


图 2.4　应变片轴向受力及横向效应□

3. 机械滞后、零漂和蠕变

应变片安装在试件上以后，在一定的温度下，应变片的指示应变 ε_i ($\Delta R/R$) 与试件机械应变 ε_R 应该是一个确定关系，但试验表明，在加载和卸载过程中，对同一机械应变量，两过程的特性曲线并不重合，卸载时的指示应变高于加载时的指示应变，如图 2.5 所示，这种现象称为应变片的机械滞后。加载和卸载特性曲线之间的最大差值 $\Delta\varepsilon_m$ 称为应变片的机械滞后值。

产生机械滞后的主要原因是敏感栅、基底和粘合剂在承受机械应变 ε_R 之后留下的残余变形所致。

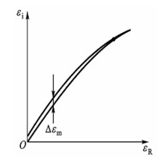


图 2.5 机械滞后

已粘贴在试件上的应变片，在温度保持恒定，试件上没有机械应变的情况下，应变片的指示会随着时间增长而逐渐变化，这就是应变片的零点漂移，简称零漂。变化的特性称为应变片的零漂。

已粘贴的应变片，温度保持恒定，在承受某一恒定的机械应变长时间作用下，应变片的指示会随时间的变化而变化，这种现象称为蠕变。一般来说，蠕变的方向与原来应变量变化的方向相反。

应变片工作时，零漂和蠕变是同时存在的，在蠕变值中包含着同一时间内的零漂值。这两项指标都是用来衡量应变片特性对时间的稳定性，在长时间测量时其意义更为突出。

4. 温度效应

粘贴在试件上的电阻应变片，除感受机械应变而产生电阻相对变化外，在环境温度变化时，也会引起电阻的相对变化，产生虚假应变，这种现象称为温度效应。温度变化对电阻应变片的影响是多方面的，这里仅考虑以下两种主要影响：

其一是当环境温度变化 Δt 时，由于敏感栅材料的电阻温度系数 α_t(即每 1 Ω 的电阻值当温度变化 1℃时的改变量)的存在，引起电阻的相对变化，即

$$(\frac{\Delta R}{R})_1 = \alpha_t \cdot \Delta t \tag{2-11}$$

其二是当环境温度变化 Δt 时，由于敏感材料和试件材料的膨胀系数不同，应变片产生附加的拉长(或压缩)，引起电阻的相对变化，即

$$(\frac{\Delta R}{R})_2 = K(\beta_g - \beta_s) \cdot \Delta t \tag{2-12}$$

式中： K ——应变片灵敏系数；

β_g ——试件膨胀系数；

β_s ——应变片敏感栅材料的膨胀系数。

因此，由于环境温度变化形成总的电阻相对变化为

$$\frac{\Delta R}{R} = (\frac{\Delta R}{R})_1 + (\frac{\Delta R}{R})_2 = \alpha_t \cdot \Delta t + K(\beta_g - \beta_s) \cdot \Delta t \tag{2-13}$$

相应地

$$\varepsilon_i = \left(\frac{\Delta R}{R}\right) \Big/ K = \left(\frac{\alpha_t}{k}\right) \cdot \Delta t + \left(\beta_g - \beta_s\right) \cdot \Delta t \tag{2-14}$$

如消除此项误差，要采取温度补偿措施。

5. 应变极限、疲劳寿命

应变片的应变极限是指在一定温度下，应变片的指示应变 ε_i 与试件的真实应变 ε_g 的相对误差达到规定值(一般为 10%)时的真实应变值 ε_j，如图 2.6 所示。

对于已安装的应变片，在恒定幅值的交变力作用下，可以连续工作而不产生疲劳损坏的循环次数 N 称为应变片的疲劳寿命。疲劳寿命反映了应变片对动态响应测量的适应性。

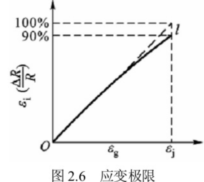


图 2.6　应变极限

6. 绝缘电阻和最大工作电流

应变片的绝缘电阻是指已粘贴的应变片的引线与被测件之间的电阻值 R_m。通常要求 R_m 在 50MΩ～100MΩ 以上。绝缘电阻下降将使测量系统的灵敏度降低，使应变片的指示应变产生误差。R_m 取决于粘合剂及基底材料的种类及固化工艺。在常温使用条件下要采取必要的防潮措施，而在中温或高温条件下，要注意选取电绝缘性能良好的粘合剂和基底材料。

对于已安装的应变片，最大工作电流是指允许通过敏感栅而不影响其工作特性的最大电流 I_{max}。显然，工作电流大，输出信号也大，灵敏度就高。但工作电流过大会使应变片过热，灵敏系数产生变化，零漂及蠕变增加，甚至烧毁应变片。工作电流的选取要根据试件的导热性能及敏感栅形状和尺寸来决定。通常静态测量时取 25mA 左右，动态测量时可取 75mA～100mA。箔式应变片散热条件好，电流可取得更大一些。在测量塑料、玻璃、陶瓷等导热性差的材料时，电流可取得小一些。

7. 应变片的电阻值

指应变片在未经安装也不受外力的情况下，于室温测得的电阻值。目前常用的电阻系列，有 60Ω、120Ω、200Ω、350Ω、500Ω、1000Ω、1500Ω 等，其中以 120Ω 最常用。

2.1.4　电阻应变片的温度误差及补偿

由于外界温度变化而给测量带来的附加误差，称为应变片的温度误差。由前面的分析可知，温度误差主要是由于敏感栅的温度系数 α_t 及敏感材料与试件材料的膨胀系数(β_s 和 β_g)的差异造成的，因此必须采取一定的补偿方法进行补偿。

1. 自补偿法

这种补偿方法是利用自身具有温度补偿作用的应变片进行补偿。

1) 选择式自补偿法(又称单丝自补偿法)

由式(2-34)可知，欲使 $\frac{\Delta R}{R}$ 不受 Δt 的影响，需满足：

$$\alpha_t = -K\left(\beta_g - \beta_s\right) \tag{2-15}$$

因此，当被测试件的线膨胀系数 β_g 已知时，如果合理选择敏感栅材料，即其电阻温度

系数 α_t、灵敏系数 K 以及线膨胀系数 β_s，满足式(2-36)，则不论温度如何变化，均有 $\frac{\Delta R}{R}=0$，从而达到了温度自补偿的目的。

这种的自补偿应变片容易加工，成本低，缺点是只适用特定材料，温度补偿范围也较窄。

2) 组合式自补偿(又称双丝自补偿法)

采用这种补偿方法的应变片，其敏感栅是由两种不同温度系数的金属电阻丝串接而成的。这两种不同的温度系数可以是相同符号，也可以是不同符号。

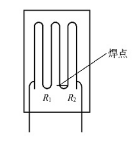


图 2.7　组合式自补偿法之一

(1) 二者具有不同符号的电阻温度系数

利用两种电阻丝材料的电阻温度系数符号不同(一个为正，另一个为负)的特性，可将二者串联绕制成敏感栅，如图 2.7 所示。

若两段敏感栅的电阻 R_1 和 R_2 由于温度变化而产生的电阻变化为 ΔR_{1t} 和 ΔR_{2t}，大小相等而符号相反，就可以实现温度补偿，即

$$\Delta R_{1t}=-\Delta R_{2t} \tag{2-16}$$

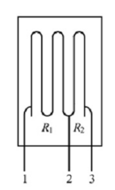
经变换得

$$\frac{R_1}{R_2}=-\frac{\frac{\Delta R_{2t}}{R_2}}{\frac{\Delta R_{1t}}{R_1}} \tag{2-17}$$

通过调节两种电阻丝的长度即可调整 R_1 和 R_2 的比例，从而控制应变片的温度补偿。这种方法的补偿效果较选择式自补偿法好，精度较高，在工作温度范围内通常可达到 $\pm 0.14\,\mu\varepsilon$ /℃。

(2) 二者具有相同符号的电阻温度系数

应变片由两种具有相同符号温度系数的电阻丝串联而成，两者可以都为正或都为负。将它们形成的两个电阻分别接入电桥相邻的两桥臂上，得到如图 2.8 所示的电桥连接方式。



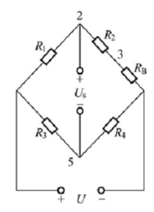


图 2.8　组合式自补偿法之二

图 2.18 中，R_1 是工作臂，R_2 与温度系数很小的附加电阻 R_B 串联组成补偿臂。调节 R_1 和 R_2 的长度比及 R_B 的值，使之满足条件

$$\frac{\Delta R_{1t}}{R_1}=\frac{\Delta R_{2t}}{R_2+R_B} \tag{2-18}$$

故可求得

$$R_B = R_1 \frac{\Delta R_{2t}}{\Delta R_{1t}} - R_2 \tag{2-19}$$

就可使两桥臂由于温度引起的电阻变化相等或接近，实现温度自补偿。补偿电阻 R_2 用温度变化产生的 ΔR_{2t} 去补偿工作臂 R_1 的 ΔR_{1t}，经计算，这种补偿可达±0.1 με/℃的高精度。但由于补偿电阻 R_2 虽比 R_1 小，但总要敏感应变，会把工作栅灵敏系数抵消一部分，因此补偿电阻的材料通常选用电阻温度系数大且电阻率小的铂或铂合金，这样只要几欧的铂电阻就能达到温度补偿，从而使应变片的灵敏系数少损失一些。

2. 线路补偿法

常用的线路补偿方法是采用电桥补偿。

图 2.9 所示为电桥补偿电路，其中 R_1 为工作应变片，R_B 为补偿应变片，R_3、R_4 为固定电阻。工作片 R_1 粘贴在被测试件上需要测量应变的地方，补偿片 R_B 粘贴在补偿块上，与被测试件温度相同，但不承受应变。

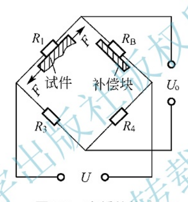


图 2.9　电桥补偿法

将 R_1、R_B 接入电桥相邻两臂，因为

$$\Delta R_{1t} = \Delta R_{Bt}$$

故输出电压 U_o 不受温度变化影响，这样就起到了温度补偿的作用。应当指出，若要实现完全补偿，上述分析过程必须满足以下三个条件：

① R_1 和 R_B 两个应变片应具有相同的电阻温度系数 α、线膨胀系数 β、应变灵敏度系数 K 和初始电阻值 R_0。

② 粘贴补偿片的补偿块材料和粘贴工作片的被测试件材料必须一样，二者的线膨胀系数相同。

③ 两应变片应处于同一温度场中。

此方法简单易行，而且能在较大的温度范围内实现补偿，缺点是上述三个条件不易满足，尤其是第三个条件，温度梯度变化大，R_1 和 R_2 很难处于同一温度场。

在应变测试的某些条件下，可通过改变应变片的粘贴位置，实现温度补偿，同时还可提高应变片的灵敏系数。如图 2.10 所示，测量梁的弯曲应变时，将 R_1 和 R_B 两个应变片分粘于梁上、下两面的对称位置，按图 2.9 接入电桥电路中。在外力 F 的作用下，R_B 与 R_1 的变化值大小相等、符号相反，电桥的输出电压将增加一倍，此时 R_B 既起到了温度补偿的作用，又提高了灵敏度。

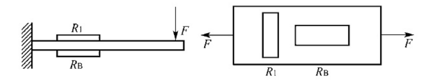


图 2.10　差动电桥补偿法

电桥补偿法简易可行，使用普通应变片可对各种试件材料在较大温度范围内进行补偿，因而最为常见。

2.1.5　测量电路

应变片将试件应变 ε 转换成电阻的相对变化 $\Delta R/R$，为了能用电测仪表进行测量，还必须经过测量电路将这种电阻的变化进一步转换成电压或电流信号。常用的测量电路是各种电桥。根据电源的不同，可将电桥分为直流电桥和交流电桥。

1. 直流电桥

1) 直流电桥平衡条件

直流电桥的输出通常很小，一般需接放大器，放大器的输入阻抗比电桥的内阻要高很多，可认为电桥的输出端为开路状态，即 $R_L \to \infty$，此时电桥又称为电压输出桥，其输出电压为

$$
\begin{aligned}
U_o &= \left(\frac{R_1}{R_1+R_2} - \frac{R_3}{R_3+R_4}\right)U \\
&= \frac{R_1R_4 - R_2R_3}{(R_1+R_2)(R_3+R_4)}U
\end{aligned}
\tag{2-20}
$$

当 $\dfrac{R_1}{R_2}=\dfrac{R_3}{R_4}$ 或 $R_1R_4=R_2R_3$ 时，电桥平衡，即欲使电桥平衡，其相邻两桥臂电阻的比值应相等，或相对两桥臂电阻的乘积应相等。

2) 电压灵敏度

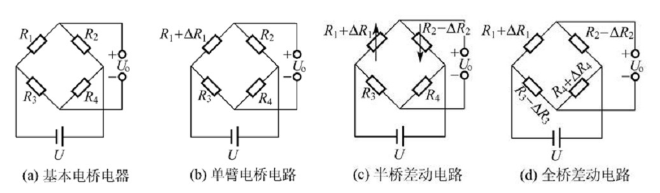
应变片工作时，其电阻值变化很小，电桥相应的输出电压也很小，一般需要加入放大器进行放大。由于放大器的输入阻抗比桥路输出阻抗高很多，所以此时仍视电桥为开路情况。

如图 2.11(b)中，R_1 为工作片，当受应变时，产生电阻变化为 ΔR_1，其他桥臂电阻 R_2、R_3、R_4 固定不变，此时电桥不平衡，电桥输出电压 $U_o \neq 0$，即

$$
\begin{aligned}
U_o &= \left(\frac{R_1+\Delta R_1}{R_1+\Delta R_1+R_2} - \frac{R_3}{R_3+R_4}\right)U \\
&= \frac{\Delta R_1 R_4}{(R_1+\Delta R_1+R_2)(R_3+R_4)}U \\
&= \frac{\dfrac{R_4}{R_3}\dfrac{\Delta R_1}{R_1}}{\left(1+\dfrac{\Delta R_1}{R_1}+\dfrac{R_2}{R_1}\right)\left(1+\dfrac{R_4}{R_3}\right)}U
\end{aligned}
\tag{2-21}
$$

设桥臂比 $n=R_2/R_1$，由于 $\Delta R_1 \ll R_1$，分母中 $\Delta R_1/R_1$ 可忽略，并考虑到平衡条件

$R_2/R_1 = R_4/R_3$，则上式可写为



(a) 基本电桥电器　(b) 单臂电桥电路　(c) 半桥差动电路　(d) 全桥差动电路

图 2.11　直流电桥

$$U_{\mathrm{o}} = \frac{n}{(1+n)^2}\frac{\Delta R_1}{R_1}U \tag{2-22}$$

电桥电压灵敏度定义为

$$K_{\mathrm{u}} = \frac{U_o}{\dfrac{\Delta R_1}{R_1}} = \frac{n}{(1+n)^2}U \tag{2-23}$$

由分析可知：

① 电桥电压灵敏度正比于电桥供电电压，供电电压越高，电桥电压灵敏度越高，但供电电压的提高受到应变片允许功耗的限制，所以要作适当选择。

② 电桥电压灵敏度是桥臂电阻比值 n 的函数，恰当地选择桥臂比 n 的值，可保证电桥具有较高的电压灵敏度。

下面分析当 U 值确定后，n 取何值时才能使 K_u 最高

即由 $\mathrm{d}K_u/\mathrm{d}n = 0$，求 K_{u} 的最大值。

由

$$\frac{\mathrm{d}K_u}{\mathrm{d}n} = \frac{1-n}{(1+n)^3} = 0 \tag{2-24}$$

求得 n=1 时，K_{u} 为最大值。这就是说，在供桥电压确定后，当 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$ 时，电桥电压灵敏度最高，此时有：

$$U_{\mathrm{o}} = \frac{U}{4}\frac{\Delta R_1}{R_1} \tag{2-25}$$

$$K_{\mathrm{u}} = \frac{U}{4} \tag{2-26}$$

从上述可知，当电源电压 U 和电阻相对变化量 $\Delta R_1/R_1$ 一定时，电桥的输出电压及其灵敏度也是定值，且与各桥臂电阻阻值大小无关。

3) 非线性误差及其补偿方法

以上分析略去了分母中的 $\Delta R_1/R_1$ 项，是在电桥输出电压与电阻相对变化成正比的理想情况下得到的，而实际情况则应按下式计算，即

$$U_o' = \frac{n\frac{\Delta R_1}{R_1}}{\left(1+n+\frac{\Delta R_1}{R_1}\right)(1+n)}U \tag{2-27}$$

可见U_o'与$\Delta R_1/R_1$的关系是非线性的，如果是四等臂电桥，$R_1=R_2=R_3=R_4$，即$n=1$，则非线性误差为

$$\delta = \frac{U_o - U_o'}{U_o'} = \frac{1}{1+\frac{1}{2}\cdot\frac{\Delta R_1}{R_1}} - 1 \approx -\frac{1}{2}\frac{\Delta R_1}{R_1} \tag{2-28}$$

为了减小和克服非线性误差，常采用差动电桥，即在试件上安装两个工作应变片，一个受拉应变，另一个受压应变，接入电桥相邻桥臂，称为半桥差动电路，如图 2.21(c)所示。

该电桥输出电压为

$$U_o = \left(\frac{\Delta R_1 + R_1}{\Delta R_1 + R_1 + R_2 - \Delta R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4}\right)U \tag{2-29}$$

若$\Delta R_1 = \Delta R_2$，$R_1 = R_2$，$R_3 = R_4$，则得

$$U_o = \frac{U}{2}\frac{\Delta R_1}{R_1} \tag{2-30}$$

此时电路输出电压U_o与$\Delta R_1/R_1$成线性关系，无非线性误差，电压灵敏度$K_u = U/2$，是单臂工作时的 2 倍，此外电路还具有温度补偿作用。

若将电桥四臂均接入应变片，如图 2.21(d)所示，即两个受拉应变，两个受压应变，将两个应变符号相同的接入相对桥臂上，就构成全桥差动电路。若$\Delta R_1 = \Delta R_2 = \Delta R_3 = \Delta R_4$，且$R_1 = R_2 = R_3 = R_4$，则

$$U_o = \frac{\Delta R_1}{R_1}U \tag{2-31}$$

$$K_u = U \tag{2-32}$$

此时电路输出电压U_o与$\Delta R_1/R_1$仍是线性关系，且电压灵敏度$K_u = U$，是单臂工作时的 4 倍。

以上讨论的均为电桥负载电阻为无穷大时的电压输出桥的工作情况，如果电桥的输出功率足够大，不需要后面接放大器，而直接接阻抗较小的指示仪表，即负载电阻为有限值R_L，这时电桥称为功率输出桥，需输出电流。

对于功率输出桥，电桥的内阻R_r是指将电源端短路时电桥的输出电阻，即R_r＝($R_1 // R_2$)串($R_3 // R_4$)，则

$$R_r = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + \frac{R_3 + R_4}{R_3 + R_4} \tag{2-33}$$

输出电流

$$I_L = U\frac{R_1 R_4 - R_2 R_3}{R_L(R_1+R_2)(R_3+R_4) + R_1 R_2 (R_3+R_4) + R_3 R_4 (R_1+R_2)} \tag{2-34}$$

2. 交流电桥

以上分析的是直流电桥，直流电桥中高精度直流电源比较容易获得，电桥平衡调节简单，传感器引线分布参数影响小。不过由于电桥输出电压很小，一般都需要加放大器，而直流放大器易于产生零漂，线路也较复杂，因此现在应变电桥多采用交流电桥。

采用交流供电的交流电桥，其平衡条件、引线分布参数影响、后续信号放大线路等许多方面与直流电桥存在明显差异。

图 2.2 为半桥差动交流电桥的一般形式，$\dot{U}$ 为交流电压源，由于电桥电源为交流电源，故引线分布电容使得两桥臂应变片呈现复阻抗特性，即相当于两只应变片各并联了一个电容，则每一桥臂上复阻抗分别为

$$\left.\begin{aligned} Z_1 &= \frac{R_1}{1+\mathrm{j}\omega R_1 C_1} \\ Z_2 &= \frac{R_2}{1+\mathrm{j}\omega R_2 C_2} \\ Z_1 &= R_3 \\ Z_4 &= R_4 \end{aligned}\right\}$$

由交流电路分析可得

$$\dot{U}_{\mathrm{o}} = \dot{U}\frac{Z_1 Z_4 - Z_2 Z_3}{(Z_1+Z_2)(Z_3+Z_4)} \tag{2-35}$$

要满足电桥平衡条件，即 $U_O = 0$，则有

$$Z_1 Z_4 = Z_2 Z_3 \tag{2-36}$$

将 Z_1、Z_2、Z_1、Z_1 表达式代入，可得

$$\frac{R_1}{1+\mathrm{j}\omega R_1 C_1} R_4 = \frac{R_2}{1+\mathrm{j}\omega R_2 C_2} R_3$$

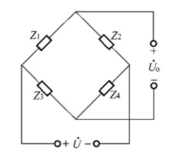
整理得

$$\frac{R_3}{R_1} + \mathrm{j}\omega R_3 C_1 = \frac{R_4}{R_2} + \mathrm{j}\omega R_4 C_2$$

其实部、虚部应分别相等，并整理可得交流电桥的平衡条件为

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{R_4}{R_3} \tag{2-37}$$

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{C_1}{C_2} \tag{2-38}$$



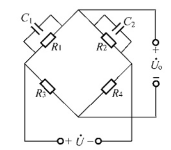


图 2.12　交流电桥

可见，对于这种交流桥，除要满足电阻平衡条件外，还必须满足电容平衡条件，为此在桥路上除设由电阻平衡调节外还设有电容平衡调节。常见的交流电桥平衡调节电路如图 2.13 所示。

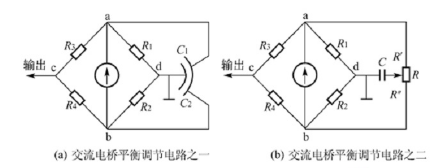


图 2.13　常见交流电桥平衡调节电路

【小思考】

1．什么是应变效应？应变式传感器的测量原理。
2. 测量电路的三种形式各有什么特点?
3. 应变片的温度补偿方法?

2.2　压阻式传感器

金属电阻应变式传感器虽然有很多优点，但却存在一大弱点，就是灵敏系数低(约为2.0～3.6)。在20世纪50年代中期出现了半导体应变片制成的压阻式传感器，其灵敏系数比金属电阻式传感器高几十倍，而且具有体积小、分辨率高、工作频带宽、机械迟滞小、传感器与测量电路可实现一体化等优点，因此在实际中得到了广泛的应用。

2.2.1　工作原理

压阻式传感器是基于半导体材料的压阻效应原理工作的。当对半导体材料施加应力作用时，半导体材料的电阻率将随着应力的变化而发生变化，进而反映到电阻值也发生变化，因此它也属于一种电阻式传感器。

由式(2-6)可知：

$$\frac{\Delta R}{R}=\left(1+2\mu\right)\varepsilon+\frac{\Delta\rho}{\rho}$$

对于金属材料而言，式中 $\Delta\rho/\rho$ 一项很小，即电阻率的变化很小，因而可以忽略不计，即金属电阻应变片的电阻的变化主要由金属材料的几何尺寸所决定。但对于半导体材料而言，情况正好相反，即由材料几何尺寸变化而引起电阻的变化很小，可忽略不计，而 $\Delta\rho/\rho$ 一项很大，也就是说，半导体材料电阻的变化主要由半导体材料电阻率的变化所造成的，

这就是压阻式传感器的工作原理。

压阻式传感器电阻的变化一般可表示为

$$\frac{\Delta R}{R} \approx \frac{\Delta \rho}{\rho} = \pi\sigma \tag{2-39}$$

式中　π ——压阻系数；

σ ——应力。

由于弹性模量 $E = \sigma / \varepsilon$，故式(2-60)又可表示为

$$\frac{\Delta R}{R} = \pi\sigma = \pi E\varepsilon = K\varepsilon \tag{2-40}$$

式中　K ——灵敏系数（$K = \pi E$）。

可见，当半导体应变片受到外界应力的作用时，其电阻(率)的变化与受到应力的大小成正比，这就是压阻传感器的工作原理。

需要指出的是，对于不同的半导体，压阻系数和弹性模量都是不一样的，所以灵敏系数也各不相同，但总的来说，压阻式传感器的灵敏系数大大高于金属电阻应变片的灵敏系数，大约是其 50～100 倍，这也是压阻式传感器的一个突出优点。

2.2.2　影响压阻系数的因素

1. 应力的作用方向

由于半导体材料的各向异性，在实际应用中，随着外界应力施加方向的不同其压阻系数也是不同的。半导体材料的晶向如图 2.14 所示，通常采用密勒指数法，将晶向表示成三位由 0 和 1 组成的数字，并加方括号表示。目前使用最多的是单晶硅半导体，实践表明，对于 P 型单晶硅半导体沿[111]晶向的压阻系数最大，可得到最大的压阻效应，而沿[100]晶向的压阻系数最小。对于 N 型单晶硅半导体，正好与之相反。对于这两种单晶硅半导体沿[110]晶向的压阻系数仅比最大压阻系数稍小些。

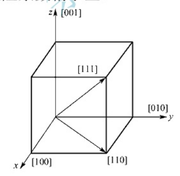


图 2.14　半导体晶向

通常根据外界应力相对晶轴的方向，分为纵向应力 σ_L 和横向应力 σ_t，与晶轴方向一致的应力称为纵向应力，与晶轴方向垂直的应力称为横向应力。与之相关的就有纵向压阻系数 π_L 和横向压阻系数 π_t。

当半导体同时受到两向应力作用时，有

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = \pi_L\sigma_L + \pi_t\sigma_t \tag{2-41}$$

2. 扩散杂质的表面浓度

压阻系数与扩散杂质表面浓度 N_S 的关系如图 2.15 所示。上面一条曲线为室温条件下(27℃)P 型硅扩散层的压阻系数 π_{44} 与表面杂质浓度 N_S 的关系曲线；下面一条曲线为室温条件下 N 型硅扩散层的压阻系数 π_{11} 与表面杂质浓度 N_S 的关系曲线。压阻系数随扩散杂质浓度的增加而减小，表面杂质浓度相同时，P 型硅的压阻系数值比 N 型硅的(绝对)值高，因此选 P 型硅有利于提高敏感元件的灵敏度。

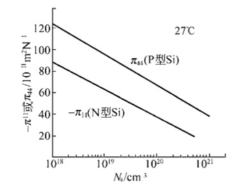


图 2.15　压阻系数与表面杂质的浓度的关系

3. 环境温度

压阻系数与环境温度的关系如图 2.16 所示，图 2.16(a)为 P 型硅压阻系数 π_{44} 与温度的关系，图 2.16(b)为 N 型硅压阻系数 π_{11} 与温度的关系。表面杂质浓度低时，随温度升高，压阻系数下降快；提高表面杂质浓度，随温度升高，压阻系数下降趋缓。从温度影响看，扩散杂质的表面浓度高些好。但从图 2.15 看出，提高扩散浓度也要降低压阻系数，而且高浓度扩散时，扩散层 P 型硅与衬底(膜片)N 型硅间 PN 结耐击穿电压也下降，从而使绝缘电阻下降。总之，实际应用时，需对压阻系数、绝缘电阻以及温度的影响等诸因素综合加以考虑。

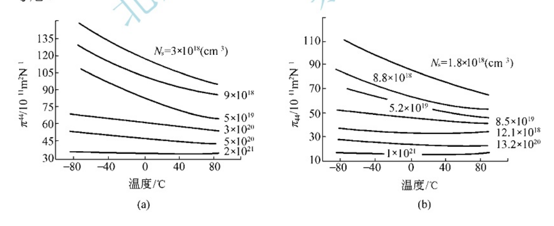


图 2.16　压阻系数与温度的关系

2.2.3　压阻式传感器的材料

一般半导体应变片是沿所需的晶向将硅单晶体切成条形薄片，厚度约为 0.05mm～0.08mm，在硅条两端先真空镀膜蒸发一层黄金，再用细金丝分别与两电极焊接。硅条是感压部分，基底起支撑和绝缘作用，采用胶膜材料，电极一般用康铜箔，外引线用镀银铜线。

图 2.17 所示是一种条形半导体应变片。为提高灵敏度，除应用单条应变片外，还有制成栅形的。各种应变片的技术参数、特性及使用要求可参见有关应变片手册。

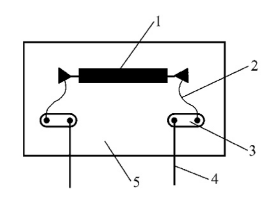


图 2.17　半导体应变片

1—P 型单晶硅条；2—内引线；3—焊接电极；4—外引线；5—基底。

用于制作半导体应变片的半导体材料主要有：硅、锗、锑化铟、砷化镓等，其中最常用的是硅和锗。在硅和锗中掺进元素硼、铝、镓、铟等杂质，可以形成 P 型半导体；如掺进磷、锑、砷等，则形成 N 型半导体。掺入杂质的浓度越大，半导体材料的电阻率就越低。表 2-3 所列的硅和锗材料的参数为在不同晶向 π_L 、 E 和 K 的数值。

表 2-3　硅和锗材料参数表

参数 ＼ 材料		$Si(\rho=10^{-1}\Omega\cdot m)$		$Ge(\rho=6\times10^{-2}\Omega\cdot m)$	
		N	P	N	P
$\pi_L/(\times10^{-11}m^2\cdot N^{-1})$	[100]	–102	+6.5	–3	+6
	[110]	–63	+71	–72	+47.5
	[111]	–8	+93	–95	+65
$E/(\times10^{11}Pa)$	[100]	1.30		1.01	
	[110]	1.67		1.38	
	[111]	1.87		1.55	
K_0	[100]	–132	+10	–2	+5
	[110]	–104	+123	–97	+65
	[111]	–13	+177	–147	+103

从表 2-3 可见，用硅制作半导体应变片时，如采用 P〔111〕或 N〔100〕晶向，用锗采用 N〔111〕或 P〔111〕晶向制作时，其灵敏系数比金属丝应变片要大几十倍。此外，由表还可以看出，半导体单晶的应变系数的符号随单晶材料的导电类型而异，一般 P 型为正，N 型为负，而金属丝应变片的灵敏系数均为正值。半导体材料(如单晶硅)是各向异性材料，它的压阻系数与晶向有关。

压阻式传感器的主要不足：一是温度稳定性差(电阻值随温度变化)；二是灵敏度的非线性较大，可造成测量结果有±(3～5)%的误差，因此在使用时需采用温度补偿和非线性补

偿等措施。

【小思考】

1.什么是压阻效应?

2.影响半导体应变片灵敏系数有哪些因素?

3.半导体应变片的材料、结构?

2.3　电阻式传感器的应用

电阻式传感器应用范围很广，主要用于检测力、压力、扭矩、位移、加速度等参数。

1. 电位器式压力传感器

电位器式压力传感器是利用弹性元件(如弹簧管、膜片或膜盒)把被测的压力信号变换为弹性元件的位移，然后再将此位移转换为电刷触点的移动，从而引起输出电压或电流相应的变化。图 2.18 为 YCD-150 型远程压力表原理图。它是由一个弹簧管和电位器组成的压力传感器。电位器固定在壳体上，而电刷与弹簧管的传动机构相连接。当被测压力变化时，弹簧管的自由端位移，通过传动机构，一面带动压力表指针转动，一面带动电刷在线绕电位器上滑动，从而将被测压力值转换为电阻变化，经转换后输出一个与被测压力成正比的电压信号。

图 2.19 所示为另一种电位器式压力传感器的工作原理。在弹性敏感元件膜盒的内腔，通入被测流体压力，在此压力的作用下，膜盒中心产生位移，推动连杆上移，使曲柄轴带动电刷在电位器电阻丝上滑动，使传感器的电阻值发生变化，最后同样输出一个与被测压力成正比的电压信号。

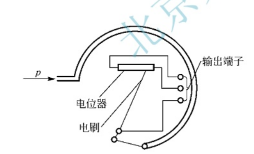


图 2.18　YCD-150 型远程压力传感器理图

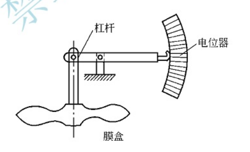


图 2.19　膜盒电位器式压力传感器原理图

2. 压阻式压力传感器

压阻式固态压力传感器由外壳、硅膜片和引线组成，结构示意图如图 2.20 所示。其核心部分是一块圆形的膜片，在膜片上利用集成电路的工艺扩散四个阻值相等的电阻，构成电桥。膜片的四周用一圆环固定，常用硅杯一体结构（见图 2.21），以减小膜片与基座连接所带来的性能变化。膜片的两边有两个压力腔，一个是和被测系统相连接的高压腔，另一个是低压腔，通常和大气相通。当膜片两边存在压力差时，膜片上各点存在应力。4 个电阻在应力作用下阻值发生变化，电桥失去平衡，输出相应的电压。该电压和膜片的两边压力差成正比，这样测得不平衡电桥的输出电压就能求得膜片所受的压力差。

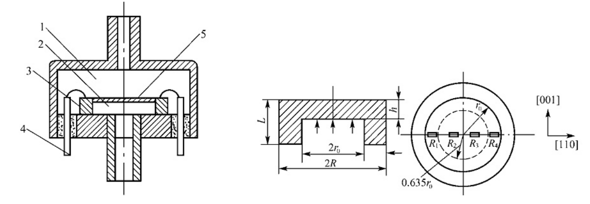


图 2.20　固态压力传感器结构图　　　　图 2.21　硅杯上法线〔110〕晶向的膜片

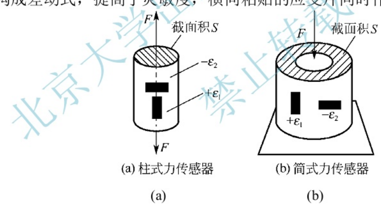
1—高压腔；2—低压腔；3—硅杯；4—引线；5—硅膜片

3. 应变式测力传感器

被测物理量为荷重或力的应变式传感器时，统称为应变式测力传感器。其主要用途是作为各种电子称与材料实验机的测力元件，要求有较高的灵敏度和稳定性，当传感器受到侧向作用力或力的作用点少量变化时，不应对输出有明显的影响。

1) 柱(筒)式力传感器

柱式传感器是称重(或测力)传感器应用较普遍的一种形式。它分为柱形和圆筒形两种，如图 2.22(a)和(b)所示。应变片一般对称地贴在应力均匀的圆柱表面的中间部分，可对称地粘贴多片，构成差动式，提高了灵敏度，横向粘贴的应变片同时作为温度补偿。



(a)　　　　(b)

图 2.22　应变式测力传感器

在外力 F 作用下产生的轴向应变为

$$\varepsilon = \frac{F}{SE} \tag{2-42}$$

式中　E——杨氏模量($\mathrm{N/m^2}$)

柱式力传感器的截面积随载荷改变可导致非线性，需对此进行补偿。而筒式结构可使分散在端面的载荷集中到筒的表面上来，改善了应力线分布，同时在筒壁上还能开孔，可减少偏心载荷、非均布载荷的影响，从而使引起的误差更小。

2) 悬臂梁式传感器

悬臂梁式传感器是一种高精度、抗偏、抗侧性能优越的称重测力传感器。采用弹性梁及电阻应变片作敏感转换元件，组成全桥电路。当垂直正压力或拉力作用在弹性梁上时，

电阻应变片随金属弹性梁一起变形，其应变使电阻应变片的阻值变化，因而应变电桥输出与拉力(或压力)成正比的电压信号。配以相应的应变仪，数字电压表或其他二次仪表，即可显示或记录重量(或力)。

悬臂梁式传感器有多种形式，如图 2.23(a)所示为等截面梁，等截面梁就是悬臂梁的横截面处处相等的梁。当外力 P 作用在梁的自由端时，在固定端产生的应变最大，粘结应变片处的应变为

$$\varepsilon=\frac{6Pl_0}{Eh^2b} \tag{2-43}$$

在距固定端较近的表面顺着梁的长度方向分别贴上 R_1、R_2 和 R_3、R_4（R_2、R_3 在底部，图中未画出)4 个电阻应变片。若 R_1、R_4 受拉力，则 R_2、R_3 将受到压力，两者应变相等，但极性相反，即将它们组成差动全桥，则电桥的灵敏度为单臂工作时的 4 倍。

如图 2.23(b)所示为等强度梁的结构，它是一种特殊形式的悬臂梁。其特点是：沿梁长度方向的截面按一定规律变化，当集中力 P 作用在梁端三角形顶点时，在梁表面整个长度 l 方向上产生的应变大小相等，与贴片位置无关。其应变大小可由下式计算：

$$\varepsilon=\frac{6Pl}{Eh^2b} \tag{2-44}$$

这种梁的优点是在长度方向上粘贴应变片的要求不严格。

如图 2.23(c)所示为双孔梁，多用于小量程工业电子秤和商业电子秤。如图 2.23(d)所示为“S”形弹性元件，适用于测量较小载荷。

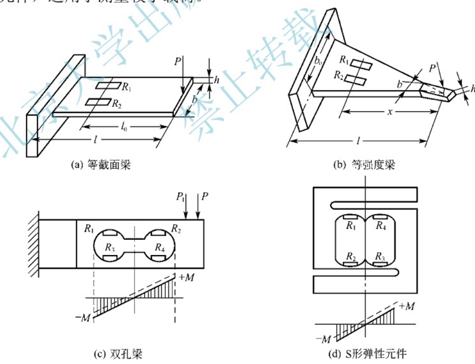


图 2.23　悬臂梁传感器

悬臂梁式传感器一般可测 0.5 kg 以下的载荷，最小可测几十克重。也可达到很大的量程，如钢制工字悬臂梁结构传感器量程为 0.2 t～30 t，精度可达 0.02%(FS)。

悬臂梁式传感器具有结构简单、应变片容易粘贴，灵敏度高等特点。

4. 应变式压力传感器

该类传感器的弹性敏感元件为一周边固定的圆形金属平膜片，如图 2.24 所示。

当膜片一面受压力 P 作用时，膜片的另一面(应变片粘贴面)上的径向应变 ε_{r} 和切向应变 ε_{t} 为

$$\varepsilon_{\mathrm{t}}=\frac{3P}{8Eh^2}(1-\mu^2)(r-x^2) \tag{2-45}$$

$$\varepsilon_{\mathrm{r}}=\frac{3P}{8Eh^2}(1-\mu^2)(r-3x^2) \tag{2-46}$$

式中，r 为平膜片工作部分半径；h 为平膜片厚度；E 为膜片的弹性模量；μ 为膜片的泊松系数；x 为任意点离圆心的径向距离。

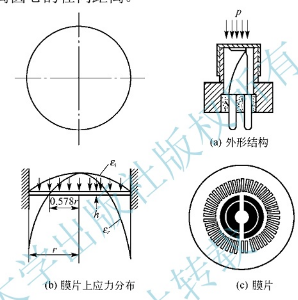


图 2.24　应变式压力传感器

5. 应变式加速度传感器

以上介绍的几类均为力(集中力和均匀分布力)直接作用在弹性元件上，将力变为应变。然而加速度是运动参数，所以首先要经过质量弹簧的惯性系统将加速度转换为力 F，再作用于弹性元件上。

应变式加速度传感器的结构如图 2.25 所示，在等强度梁 2 的一端固定惯性质量块 1，梁的另一端用螺钉固定在壳体 6 上，在梁的上、下两面粘贴应变片 5，梁和惯性块的周围充满阻尼液(硅油)，用以产生必要的阻尼。测量时，将传感器壳体和被测对象刚性连接。当有加速度作用在壳体上时，由于梁的刚度很大，惯性质量也以同样的加速度运动，其产生的惯性力正比于加速度 a 的大小($F=ma$)，惯性力作用在梁的端部使梁产生变形，限位块 4 的作用是保护传感器在过载时不被破坏。这种传感器在低频振动测量中得到了广泛的应用。

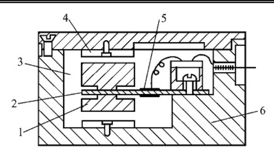


图 2.25　应变式加速度传感器

1—惯性质量块；2—等强度梁；3—腔体；4—限位块；5—应变片；6—壳体

本 章 小 结

本章主要介绍应变片式传感器和压阻式传感器。

应变式电阻传感器分为金属电阻应变片和半导体应变片两种，分别基于应变效应和压阻效应原理制成，故有时半导体应变片也称为压阻式传感器。金属电阻应变片结构简单、性能可靠、应用范围广、适用性强，但灵敏度较小，受温度变化影响大。

半导体应变片的最大优点是灵敏度高，可达金属电阻应变片的几十倍，不过同样存在着温度稳定性较差，非线性较大等不足，需采取温度补偿和非线性补偿等措施。

金属应变片的工作原理（应变效应）、测量电路（电桥）分析及温度误差补偿方法是本章的学习重点，同时也要结合实例，学会分析电阻式传感器的实际应用。

思考题与习题

2-1　填空题

（1）电阻应变片分为（　　　　　　）和（　　　　　　　）两大类。

（2）金属丝式应变片由（　　　）、（　　）、（　　　）、（　　　）和（　　　）。

（3）电阻应变片的温度误差补偿方法包括（　　　　　）和（　　　　　）。

2-2　金属电阻应变片与半导体应变片在工作原理上有何不同？

2-3　金属电阻应变片的灵敏系数 K 的物理意义是什么？与电阻丝的灵敏系数 k_0 有何不同？主要受哪些因素的影响？

2-4　什么是横向效应？其产生的原因是什么？

2-5　应变片的电阻值 R_0=120Ω，灵敏系数 K=2.0，用作应变为 500um/m 的传感元件，

若电源电压 U=4V，求此时电桥的输出电压 U_0？

2-6　在测量时，为什么要对应变片式电阻传感器进行温度补偿，分析说明常用的温度误差补偿方法。

2-7　拟在等截面的悬臂梁上粘贴 4 个完全相同的电阻应变片组成差动全桥电路，试问：4 个应变片应怎样粘贴在悬臂梁上，并画出相应的电桥电路。

2-8　图 2.26 所示为电阻应变片电桥电路，图中 $R_2 = R_3 = R$ 是固定电阻，R_1 与 R_4 是对称放置的电阻应变片，工作时 R_1 受拉，R_4 受压，ΔR 表示应变片发生应变后电阻值的变化量。当应变片不受力，无应变时 $\Delta R = 0$，桥路处于平衡状态；当应变片受力发生应变时，桥路失去平衡，这时，桥路输出电压 U_{cd} 表示应变片发生应变后电阻值的变化量。试证明：

$$U_{cd} = -\frac{E}{2} \cdot \frac{\Delta R}{R}$$

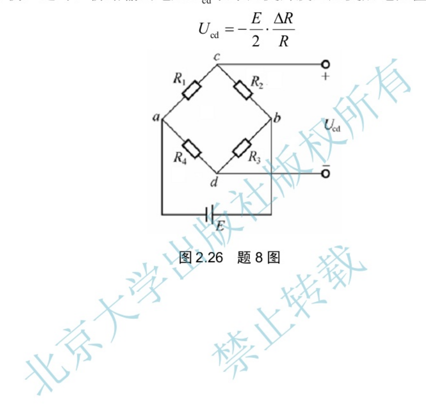


图 2.26　题 8 图

第 3 章　电感式传感器

【教学目标】

要求了解电感传感器的测量原理，掌握自感式传感器、差动变压器和电涡流传感器的特性及测量电路，针对不同类型的电感式传感器，学会运用在不同的参数检测中。

【教学要求】

知识要点	能力要求	相关知识
传感器原理	了解	物理、数学
结构和类型	掌握自感式、差动变压器、电涡流特性	电子、电路、数学
测量电路	掌握几种测量电路的分析	电路、电子
传感器的应用	熟悉和掌握传感器在参数检测中的应用	工程

【导入案例】

随着中国市场对汽车需求，以及对车辆性能要求的提升。汽车制造商在新建项目上，对其作业生产线也有更高的标准。一方面，需要达到汽车制造工艺的要求；再者，需要保证整条线稳定顺畅的运行、尽量减少维护和调试的时间，以保证较高的生产效率。

从汽车生产工艺上来看，国内汽车制造业的自动化水平大幅提升，明显趋势于提高装配精度、提高生产效率。众所周知，汽车制造环节主要包括四个主体部分：冲压、焊装、涂装、总装。作为定位及检测手段，多种传感器已经普及到生产线各个环节中，尤其是电感式传感器大量的应用于每个部分，如焊装、涂装和总装车间，许多的电感式传感器分布在积放链输送线，起到滑翘检测或分轨到位检测作用，实时监控着整条线的运行状态。

电感式开关传感器如图 1 所示是主要的应用。

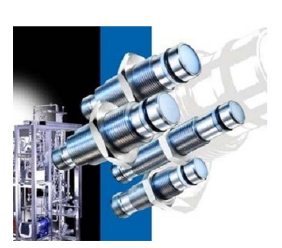


图 1　电感式接近开关



图 2 电感式传感器应用

电感式传感器用于商用车载传感器，如图 2 所示。新近研发的电感式传感器，专门针对商用车在恶劣条件下使用而定制，这个系列的传感器具有较大的开关距离和坚固的外壳，加上电子应用优化和最新的生产技术，确保了长期运行的稳定性。这种新型的传感器可在-40℃至 85℃这样一个较大的温度范围内正常工作，工作电压为 8.4-65VDC，因此它可以在 12V 和 24V 的线路板上的电子系统中使用。由于这种传感器外壳坚固（V4A 导线和 PBT-GF30 方形组件），因此具有良好的抗振性，并能够抵御剧烈的温度变化和盐雾腐蚀。不仅如此，较大的开关距离和齐平的安装方式保护其免受机械损伤

电感式传感器是建立在电磁感应的基础上，利用线圈自感或互感的改变来实现非电量的检测。它可以把输入物理量，如位移、振动、压力、流量、比重、力矩、应变等参数，转换为线圈的自感系数 L、互感系数 M 的变化，再由测量电路转换为电流或电压的变化，因此，它能实现信息远距离传输、记录、显示和控制，在工业自动控制系统中被广泛采用。

电感式传感器具有结构简单、工作可靠、抗干扰能力强、输出功率较大、分辨力较高(如在测量长度时一般可达 0.1 μm)、示值误差一般为示值范围的 0.1%～0.5%，稳定性好等一系列优点，其主要缺点是灵敏度、线性度和测量范围相互制约，传感器自身频率响应低，不适用于快速动态测量。

电感式传感器的种类很多，本章主要介绍利用自感原理的自感式传感器(通常称为电感式传感器)，利用互感原理的互感式传感器(通常称为差动变压器式传感器)，利用涡流原理的电涡流式传感器。

3.1　自感式传感器

3.1.1　工作原理

自感式传感器是把被测量的变化转换成自感 L 的变化，通过一定的转换电路转换成电压或电流输出。按磁路几何参数变化形式的不同，目前常用的自感式传感器有变气隙式、变面积式和螺线管式三种。

图 3.1 所示是自感式传感器的原理图。图 3.1(a)是气隙型传感器的结构原理图，它由线圈、铁芯、衔铁三部分组成，在铁芯与衔铁之间有气隙，厚度为 δ，被测物理量的运动部分与衔铁相连，当传感器的衔铁产生位移时，线圈的自感量 L 也会发生变化。

如果空气隙 δ 较小，且不考虑磁路的铁损，则线圈的自感可按下式计算：

$$L = \frac{N^2}{\sum_{i=1}^{n} \frac{l_i}{\mu_i S_i} + \frac{2\delta}{\mu_0 S}} \tag{3-1}$$

式中，N 为线圈匝数；μ_0 为真空磁导率，其值为 $4\pi \times 10^{-7}\,\mathrm{H/m}$；$S$ 为空气隙磁通截面积。l_i 为各段导磁体的长度(磁通通过铁芯、衔铁的长度)，μ_i 为各段导磁体(铁芯、衔铁)的磁导率，S_i 为各段导磁体(铁芯、衔铁)的截面积。

因为导磁体的磁导率远大于空气磁导率，即气隙磁阻远大于铁芯和衔铁的磁阻，所以

线圈的自感为

$$L=\frac{N^2}{\frac{2\delta}{\mu_0 S}}=\frac{N^2\mu_0 S}{2\delta} \tag{3-2}$$

由式(3-2)可以看出，当线圈匝数一定时，电感量与空气隙厚度成反比，与空气隙相对截面积成正比。若 S 不变，δ 变化，则 L 为 δ 的单值函数，可构成变气隙式传感器，如图 3.1(a)所示。若 δ 不变，S 变化，则可构成变截面积式传感器，如图 3.1(b)所示。若线圈中放入圆柱形衔铁，则是一个可变自感，当衔铁上、下移动时，自感量将相应发生变化，这就构成了螺线管型自感传感器，如图 3.1(c)所示。

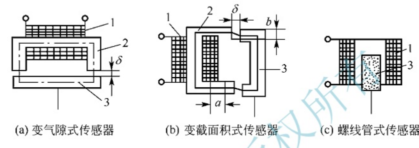


图 3.1　自感式传感器原理图

1—线圈；2—铁芯；3—衔铁。

上述自感传感器，虽然结构简单，运行方便，但也有缺点，如自线圈流往负载的电流不可能等于 0，衔铁永远受有吸力，线圈电阻受温度影响，有温度误差，不能反映被测量的变化方向等，因此在实际中应用较少，而常采用差动自感传感器。差动自感传感器对干扰、电磁吸力有一定补偿的作用，还能改善特性曲线的非线性。

如图 3.2 所示为差动变隙式电感传感器的原理结构图。由图可知，差动变隙式电感传感器由两个相同的电感和磁路组成。测量时，衔铁通过导杆与被测位移量相连，当被测体上、下移动时，导杆带动衔铁也以相同的位移上、下移动，使磁回路中磁阻发生大小相等、方向相反的变化，导致一个线圈的电感量增加，另一个线圈的电感量减小，形成差动形式。当差动使用时，两个电感线圈接成交流电桥的相邻桥臂，另两个桥臂由电阻组成，电桥输出电压与△L 有关。

差动变隙式自感传器的工作原理

① 初态时：若结构对称，且动铁居中，则 $\delta_1=\delta_2\rightarrow L_1=L_2\rightarrow I_1=I_2\rightarrow I=0\rightarrow U_o=0$。

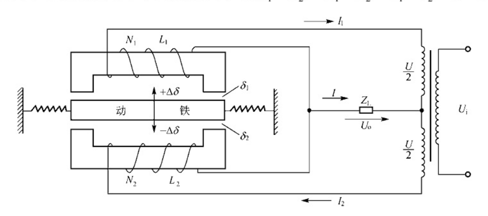


图 3.2　差动变隙式自感传感器原理图

② 动铁上移时：则

$\delta_1\downarrow\rightarrow L_1\uparrow\rightarrow I_1\downarrow=I_1-\Delta I$

$\delta_2\uparrow\rightarrow L_2\downarrow\rightarrow I_2\uparrow=I_2-\Delta I$

$I=I_2\uparrow-I_1\downarrow=(I_2+\Delta I)-(I_1-\Delta I)=2\Delta I$

$U_o=IZ_L=2\Delta IZ_L$

③ 动铁下移时：同理可得

$U_o=IZ_L=-2\Delta IZ_L$

由以上分析可得，动铁位移时，输出电压的大小和极性将跟随位移的变化而变化。输出电压不但能反映位移量的大小，而且能反映位移的方向。由前面的推导可知，输出电压正比于 $2\Delta I$，因而灵敏度较高，非线性减小。

3.1.2　特性分析

根据式(3-2)，自感式传感器特性曲线如图 3.3 所示，可以看出 $L=f(\delta)$ 不是线性的，是一双曲线，当 $\delta=0$ 时，L 为∞，如果考虑到导磁体的磁阻，即当 $\delta=0$ 时，L 不等于∞，而有一定的数值，其曲线在 δ 较小时，如图 3.3 中虚线所示。如上下移动衔铁使面积 S 改变，从而改变 L 值时，则 $L=f(S)$ 的特性为一条直线。

对气隙型传感器，因为导磁体的磁导率 μ_i 远大于空气磁导率 μ_0。因此，由它所产生的自感可用式(3-2)来描述，可知自感 L 与气隙 δ 的关系为双曲线。

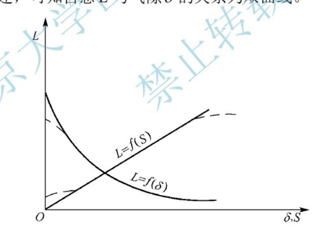


图 3.3　自感传感式器特性曲线

设电感式传感器初始气隙为 δ_0，初始电感量为 L_0，衔铁位移引起的气隙变化量为 $\Delta\delta$，从式(3-2)可知，ΔL 与 $\Delta\delta$ 之间是非线性关系。初始电感量为

$$L_0=\frac{N^2\mu_0 S}{2\delta_0} \tag{3-3}$$

为了保证一定的测量范围和线性度，一般取 $\Delta\delta=(0.1\sim0.2)\delta_0$。

电感的变化量为

$$\begin{aligned}\Delta L = L - L_0 &= \frac{N^2\mu_0 S}{2(\delta_0 + \Delta\delta)} - \frac{N^2\mu_0 S}{2\delta_0} \\ &= \frac{N^2\mu_0 S}{2\delta_0}\left(\frac{\delta_0}{\delta_0 + \Delta\delta} - 1\right) \\ &= L_0 \frac{-\Delta\delta}{\delta_0 + \Delta\delta}\end{aligned} \tag{3-4}$$

电感的相对变化量为

$$\frac{\Delta L}{L_0} = \frac{-\Delta\delta}{\delta_0 + \Delta\delta} = -\frac{\Delta\delta}{\delta_0}\frac{1}{1 + \dfrac{\Delta\delta}{\delta_0}} \tag{3-5}$$

当$\dfrac{\Delta\delta}{\delta_0} << 1$时，上式用泰勒级数展开成如下的级数形式即

$$\frac{\Delta L}{L_0} = -\frac{\Delta\delta}{\delta_0}\left[1 - \frac{\Delta\delta}{\delta_0} + \left(\frac{\Delta\delta}{\delta_0}\right)^2 - \left(\frac{\Delta\delta}{\delta_0}\right)^3 + \cdots\right] \tag{3-6}$$

将上式作线性处理，忽略高次项，可得

$$\frac{\Delta L}{L_0} = -\frac{\Delta\delta}{\delta_0} \tag{3-7}$$

式中负号表示若气隙增大，则电感减小；若气隙减小，则电感增大。

由式(3-7)可知，气隙型电感传感器的灵敏度为

$$K = \left|\frac{\Delta L / L_0}{\Delta\delta}\right| = \frac{1}{\delta_0} \tag{3-8}$$

K 等于电感量的相对变化量与气隙变化量之比。

非线性误差与$\dfrac{\Delta\delta}{\delta_0}$的大小有关，其表达式为

$$\gamma = \frac{\left|\dfrac{\Delta\delta}{\delta_0}\right|^2}{\left|\dfrac{\Delta\delta}{\delta_0}\right|} = \left|\frac{\Delta\delta}{\delta_0}\right| \times 100\% \tag{3-9}$$

实际上，高次项是造成非线性的主要原因。当$\dfrac{\Delta\delta}{\delta_0}$越小时，则高次项迅速减小，非线性得到改善。

由此可见，变气隙式电感传感器的测量范围与灵敏度及线性度相矛盾，所以变气隙式电感传感器用于测量微小位移时是比较精确的。为了减小非线性误差，实际测量中广泛采用差动式电感传感器。

从图 3.2 可知，若衔铁向上移动时，差动式电感传感器的电感变化量为

$$\begin{aligned}\Delta L = L_1 - L_2 &= \frac{N^2\mu_0 S}{2(\delta_0-\Delta\delta)} - \frac{N^2\mu_0 S}{2(\delta_0+\Delta\delta)} \\ &= \frac{N^2\mu_0 S}{2\delta_0}\left(\frac{\delta_0}{\delta_0-\Delta\delta} - \frac{\delta_0}{\delta_0+\Delta\delta}\right) \\ &= 2L_0\frac{\Delta\delta}{\delta_0}\frac{1}{1-\left(\frac{\Delta\delta}{\delta_0}\right)^2}\end{aligned} \tag{3-10}$$

电感的相对变化量为

$$\frac{\Delta L}{L_0} = 2\frac{\Delta\delta}{\delta_0}\frac{1}{1-\left(\frac{\Delta\delta}{\delta_0}\right)^2} \tag{3-11}$$

当 $\frac{\Delta\delta}{\delta_0} << 1$时，式(3-11)用泰勒级数展开成级数形式为

$$\frac{\Delta L}{L_0} = 2\frac{\Delta\delta}{\delta_0}\left[1+\left(\frac{\Delta\delta}{\delta_0}\right)^2+\left(\frac{\Delta\delta}{\delta_0}\right)^4+\left(\frac{\Delta\delta}{\delta_0}\right)^8+\cdots\right] \tag{3-12}$$

对上式作线性处理，忽略高次项，可得

$$\frac{\Delta L}{L_0} = 2\frac{\Delta\delta}{\delta_0} \tag{3-13}$$

其灵敏度为

$$K = \left|\frac{\Delta L / L_0}{\Delta\delta}\right| = \frac{2}{\delta_0} \tag{3-14}$$

非线性误差为

$$\gamma = \frac{\left|\frac{\Delta\delta}{\delta_0}\right|^3}{\left|\frac{\Delta\delta}{\delta_0}\right|} = \left|\frac{\Delta\delta}{\delta_0}\right|^2 \times 100\% \tag{3-15}$$

可见，灵敏度提高了 1 倍，非线性误差减小了一个数量级。另外采用差动式传感器，还能抵消温度变化、电源波动、外界干扰、电磁吸力等因素对传感器的影响。

比较单线圈和差动两种变隙式电感传感器的特性，可以得到如下结论：

(1) 差动式比单线圈式的灵敏度高 1 倍。

(2) 差动式的非线性项等于单线圈非线性项乘以($\Delta\delta/\delta_0$)因子，因为($\Delta\delta/\delta_0$) $<<1$，所以差动式的线性度得到明显改善。

为了使输出特性能得到有效改善，构成差动的两个变隙式电感传感器在结构尺寸、材料、电气参数等方面均完全一致。

通过对变气隙类型传感器的分析，同样可以得出变面积式和螺线管式两种类型传感器的特性，此处不在详述。对三种类型自感式传感器相比较，变气隙式灵敏度最高(原始气隙 δ 一般取值很小，约为 0.1 mm～0.5mm)，因而它对电路的放大倍数要求很低，缺点是非线性严重，为了限制非线性误差，示值范围只能很小(最大示值范围 $\Delta\delta < \delta/5$)，自由行程小(衔铁在 $\Delta\delta$ 方向运动受铁芯限制)，制造装配困难。变面积式的优点是具有较好的线性，示值范围较大，自由行程也较大。螺线管式灵敏度最低，但示值范围大，自由行程大，且其主要优点是结构简单，制造装配容易，但灵敏度低是其缺点，可以在放大电路方面加以解决，

因此目前螺管型自感传感器用得越来越多。

3.1.3 测量电路

自感式传感器实现了把被测量的变化转变为自感的变化，为了测出自感的变化，同时也为了送入下级电路进行放大和处理，就要用转换电路把自感转换为电压或电流的变化。一般，可将自感变化转换为电压(电流)的幅值、频率、相位的变化，它们分别称为调幅、调频、调相电路。在自感式传感器中一般采用调幅电路，调幅电路的主要形式有变压器电桥和交流电桥，而调频和调相电路用得较少。

1. 变压器电桥

图 3.4 是差动自感传感器的变压器电桥。电桥两臂 Z_1 和 Z_2 为传感器两线圈的等效阻抗，另外两臂为交流变压器的两个副边，副边电压均为 $u/2$，供桥电源由带中心抽头的变压器次级线圈供给，在图示状态下，由电路分析可得

$$\dot{U}_A = \dot{U}\frac{Z_1}{Z_1+Z_2}$$

$$\begin{aligned}\dot{U}_o &= \dot{U}_A - \dot{U}_B \\ &= \left(\frac{Z_1}{Z_1+Z_2}-\frac{1}{2}\right)\dot{U} \\ &= \frac{Z_1-Z_2}{Z_1+Z_2}\cdot\frac{\dot{U}}{2}\end{aligned} \tag{3-16}$$

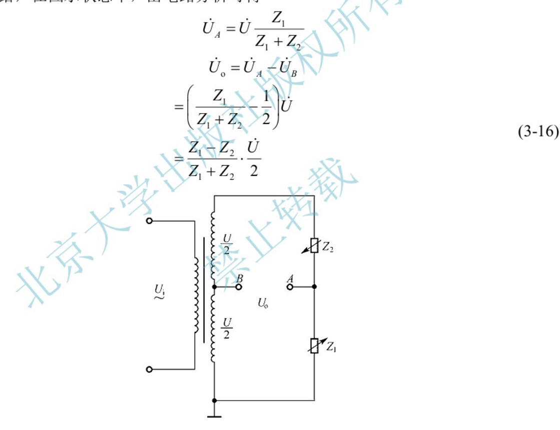


图 3.4 变压器电桥

① 初态时：由于动铁居中，即 $Z_1 = Z_2 = Z$，$U_o = 0$，说明电桥处于平衡状态。

② 动铁芯上移时：则

$\delta_1 \downarrow \rightarrow L_1 \uparrow \rightarrow Z_1 \uparrow = Z + \Delta Z$

$\delta_2 \uparrow \rightarrow L_2 \downarrow \rightarrow Z_2 \downarrow = Z - \Delta Z$

代入式(3-16)得

$$\dot{U}_o = \left(\frac{Z+\Delta Z}{Z+\Delta Z+Z-\Delta Z}-\frac{1}{2}\right)\dot{U} = \frac{\Delta Z}{2Z}\dot{U} \tag{3-17}$$

③ 动铁芯下移时：同理可得

$$\dot{U}_{\mathrm{o}}=\left(\frac{Z-\Delta Z}{Z-\Delta Z+Z+\Delta Z}-\frac{1}{2}\right)\dot{U}=-\frac{\Delta Z}{2Z}\dot{U} \tag{3-18}$$

由以分析可知，输出电压的大小反映动铁位移的大小，输出电压的极性反映动铁位移的方向。当衔铁上、下移动时，输出电压大小相等，但方向相反。

变压器电桥的输出电压幅值与输出阻抗均与交流电桥的相同。这种电桥与电阻平衡臂电桥相比，元件少，输出阻抗小，桥路开路时电路呈线性；缺点是变压器副边不接地，容易引起来自原边的静电感应电压，使高增益放大器不能工作。

2. 带相敏整流的交流电桥

差动自感传感器采用如图 3.4 所示的变压器电桥，可根据式(3-16)判别衔铁位移的大小，然而输出端的交流电压表不能直接指示电桥输出电压的极性，因此无法确定动铁位移的方向，在使用交流电压表时，其实际输出特性曲线如图 3.5 所示。由于电路结构不完全对称，初态时电桥不完全平衡，因而产生静态零偏压，称之为零点残余电压，如图中实线所示，图中虚线为理想对称状态下的输出特性。

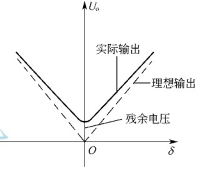


图 3.5　基本测量电桥输出特性曲线

为了既能判别衔铁位移的大小，又能判断出衔铁位移的方向，通常在交流测量电桥中引入相敏整流电路，把测量桥的交流输出转换为直流输出，而后用零值居中的直流电压表测量电桥的输出电压，原理电路如图 3.6 所示。Z_1、Z_2 和两个 R 构成了交流电桥，差动自感传感器的两个线圈 Z_1、Z_2 作为两个相邻的桥臂，平衡电阻 R 为另外两个桥臂；$VD_1 \sim VD_4$ 4 只二极管组成相敏整流电路。u_i 为供桥交流电压；U_o 为测量电路的输出电压，由零值居中的直流电压表指示输出电压的大小和极性。

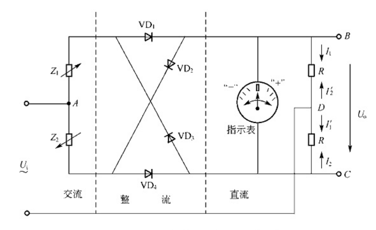


图 3.6　带相敏整流测量电桥

① 当衔铁处于中间位置时，即 $Z_1 = Z_2 = Z$，由于桥路结构对称，此 $U_\mathrm{B} = U_\mathrm{C}$，即 $U_\mathrm{o} = U_\mathrm{B} - U_\mathrm{C} = 0$。

② 当衔铁上移时，Z_1 增大，Z_2 减小，即 $Z_1 = Z + \Delta Z$，$Z_2 = Z - \Delta Z$。

如果输入交流电压为正半周，即 u_i 上正下负时(A 点电位为正，D 点电位为负)，则电路中二极管 VD_1、VD_4 导通，VD_2、VD_3 截止，电流通路为 $A\to Z_1\to VD_1\to B\to R\to VD$，$A\to Z_2\to VD_4\to C\to R\to D$，电流方向 I_1 和 I_2，如图中所示。

因为 $Z_1>Z_2$，所以 $I_1<I_2$，此时

$$U_o=U_B-U_C=U_{BD}+U_{DC}=I_1R-I_2R=R(I_1-I_2)<0$$

如果输入交流电压为负半周，即 u_i 上负下正时(D 点电位为正，A 点电位为负)，则电路中二极管 VD_2、VD_3 导通，VD_1、VD_4 截止，电流通路为 $D\to R\to C\to VD_3\to Z_1\to A$，$D\to R\to B\to VD_2\to Z_2\to A$，电流方向 I_1' 和 I_2' 如图中所示。同理可分析出 $U_0<0$。

这说明无论电源正半周或负半周，测量桥的输出状态不变，输出均为 $U_o<0$，此时直流电压表反向偏转，读数为负，表明衔铁上移。

③ 当衔铁下移时，Z_1 减小，Z_2 增大，即 $Z_1=Z-\Delta Z$，$Z_2=Z+\Delta Z$

输入交流电压为正半周时，因为 $Z_2>Z_1$，所以 $I_1>I_2$，此时

$$U_o=U_B-U_C=R(I_1-I_2)>0$$

当输入交流电压为负半周时，同理可分析出 $U_o>0$。

这说明无论电源正半周或负半周，测量桥的输出状态不变，输出均为 $U_o>0$，此时直流电压表正向偏转，读数为正，表明衔铁下移。

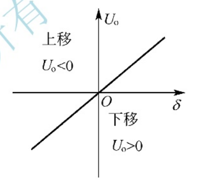


图 3.7　带相敏整流电桥输出特性

可见采用带相敏整流的交流电桥，得到的输出信号既能反映位移大小，也能反映位移的方向，其输出特性如图 3.7 所示。由图可知，测量电桥引入相敏整流后，输出特性曲线通过零点，输出电压的极性随位移方向而发生变化，同时消除了零点残余电压，还增加了线性度。

【小思考】

1.如何提高自感式传感器的灵敏度和线性度?

2.零点残余电压有什么危害?

3.2　互感式传感器

将被测量的非电量转换为互感变化量的传感器称为互感式传感器。这种互感传感器是根据变压器的基本原理制成的，并且次级绕组都用差动形式连接，故称差动变压器式传感器简称差动变压器。在这种传感器中，一般将被测量的变化转换为变压器的互感变化，变压器初级线圈输入交流电压，次级线圈则互感应出电动势。

差动变压器结构形式较多，有变隙式、变面积式和螺线管式等，但其工作原理基本一样。非电量测量中，应用最多的是螺线管式差动变压器，它可测量 1mm～100mm 的机械位移，虽然灵敏度较低，但示值范围大，自由行程(测量范围大，位移可达到 1m)可任意安排，制造装配也较方便，并具有结构简单、性能可靠等优点，因此被广泛用于非电量的测量。

3.2.1 工作原理及特性

1. 工作原理

差动变压器主要由一个绝缘线框、三个线圈(一个初级线圈 N_1、两个次级线圈 N_{21}、N_{22})和插入线圈中央的圆柱形铁芯组成。在线框上绕有一组一次线圈作为输入线圈，在同一框架上另绕两组二次线圈作为输出线圈，并在线框中央圆柱孔中放入铁芯，如图 3.8(a)所示。

在图 3.8(a)中，1 表示变压器初级线圈，21 和 22 表示变压器次级两差动线圈，为反向串联。3 为线圈绝缘框架，4 表示活动衔铁，变量□X 表示活动衔铁的位移变化量。

在忽略线圈寄生电容及衔铁损耗的理想情况下，差动变压器的等效电路如图 3.8(b)所示，R_1、L_1 为初级线圈 1 的损耗电阻和自感，R_{21} 和 R_{22} 表示两次级线圈的电阻，L_{21} 和 L_{22} 表示两次级线圈的自感，M_1、M_2 为初级线圈 N_1 与次级线圈 N_{21}、N_{22} 间的互感系数，e_{21} 和 e_{22} 表示在初级电压 u_1 作用下在两次级线圈上产生的感应电动势，图中两次级线圈反向串联，形成差动输出电压 u_2。

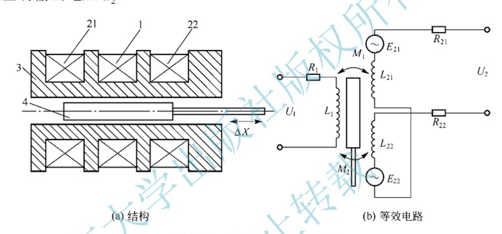


图 3.8 差动变压器原理图

当一次线圈加以适当频率的电压激励时，根据变压器的作用原理，在两个二次线圈中就会产生感应电动势，如果工艺上保证变压器结构完全对称，则当活动衔铁处于初始平衡位置时，必然会使两次级线圈的互感系数 $M_1 = M_2$。根据电磁感应原理，将有 $\dot{E}_{21} = \dot{E}_{22}$，则 $\dot{U}_2 = \dot{E}_{21} - \dot{E}_{22} = 0$，即差动变压器输出电压为 0。

当铁芯向右移动时，在右边二次线圈内穿过的磁通比左边二次线圈多些，所以互感也大些，感应电动势 $\dot{E}_{22}$ 增加；另一个线圈的感应电动势 $\dot{E}_{21}$ 随铁芯向右偏离中心位置而逐渐减小；反之， 铁芯向左移动时，$\dot{E}_{22}$ 减小，$\dot{E}_{21}$ 增加。两个二次线圈的输出电压分别为 $\dot{U}_{21}$ 和 $\dot{U}_{22}$ (空载时即为感应电动势 $\dot{E}_{21}$，$\dot{E}_{22}$)，如果将二次线圈反向串联，则传感器的输出电压 $\dot{U}_2 = \dot{U}_{21} - \dot{U}_{22}$。当铁芯移动时，$U_2$ 就随着铁芯位移 x 成线性增加，其特性如图 3.9 所示，形成 V 形特性。如果以适当方法测量 U_2，就可以得到与 x 成正比的线性读数。

从图中可看出，当铁芯位于中心位置，输出电压 U_2 并不是零电位，这个电压就是零点残余电压 U_x，它的存在使传感器的输出特性曲线不经过零点，造成实际特性和理论特性不完全一致。

产生零点残余电压的原因有很多，不外乎是变压器的制作工艺和导磁体安装等问题，

主要是由传感器的两次级绕组的电气参数与几何尺寸不对称，以及磁性材料的非线性等引起的，一般U_x在几十毫伏。在实际使用时，必须设法减小，否则将会影响传感器的测量结果。

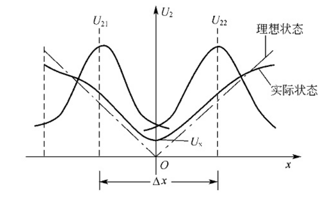


图 3.9　差动变压器输出电压特性曲线

2. 等效电路分析

差动变压器是利用磁感应原理制作的。在制作时，理论计算结果和实际制作后的参数相差很大，往往还要借助于实验和经验数据来修正。如果考虑差动变压器的涡流损耗、铁损和寄生(耦合)电容等，其等效电路是很复杂的。在理想情况下(忽略线圈寄生电容及衔铁损耗)，差动变压器的等效电路如图 3.8(b)所示。

当次级开路时，初级线圈的交流电流为

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_1}{R_1 + \mathrm{j}\omega L_1} \tag{3-19}$$

式中，ω为激励电压的角频率。

次级线圈的感应电动势为

$$\begin{cases} \dot{E}_{21} = -\mathrm{j}\omega M_1 \dot{I}_1 \\ \dot{E}_{22} = -\mathrm{j}\omega M_2 \dot{I}_1 \end{cases} \tag{3-20}$$

差动变压器的空载输出电压为

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_{21} - \dot{E}_{22} = \mathrm{j}\omega(M_2 - M_1)\frac{\dot{U}_1}{R_1 + \mathrm{j}\omega L_1} \tag{3-21}$$

其有效值为

$$U_2 = \frac{\omega(M_2 - M_1)}{\sqrt{R_1^2 + (\omega L_1)^2}} U_1 \tag{3-22}$$

可见输出电压与互感有关。

输出阻抗为

$$Z = R_{21} + R_{22} + \mathrm{j}\omega L_{21} + \mathrm{j}\omega L_{22} \tag{3-23}$$

其复阻抗的模为

$$Z = \sqrt{(R_{21} + R_{22})^2 + (\omega L_{21} + \omega L_{22})^2} \tag{3-24}$$

这样从输出端看进去，差动变压器可等效为电压U_2和复阻抗Z相串联的电压源。

由以上分析可得

① 当活动衔铁处于中间位置时，互感$M_1 = M_2$，故此时输出电压$U_2 = 0$。

② 当活动衔铁上移时，$M_1 > M_2$，此时输出电压$U_2 < 0$。

设$M_1 = M + \Delta M$，$M_2 = M - \Delta M$

$$\dot{U}_2=-\frac{2\omega\Delta M}{\sqrt{R_1^2+(\omega L_1)^2}}\dot{U}_1 \tag{3-25}$$

可看出$\dot{U}_2$与$\dot{E}_{21}$同相。③ 当活动衔铁下移时，$M_1<M_2$，此时输出电压$U_2>0$。

设$M_1=M-\Delta M$，$M_2=M+\Delta M$

$$\dot{U}_2=\frac{2\omega\Delta M}{\sqrt{R_1^2+(\omega L_1)^2}}\dot{U}_2 \tag{3-26}$$

可看出$\dot{U}_2$与$\dot{E}_{22}$同相。输出电压还可以写成

$$\dot{U}_2=\frac{2\omega M\dot{U}_1}{\sqrt{R_1^2+(\omega L_1)^2}}\frac{\Delta M}{M}=2\dot{E}_{s0}\frac{\Delta M}{M} \tag{3-27}$$

式中$\dot{E}_{s0}$为动铁处于中间平衡位置时单个次级线圈的感应电压。

因而差动变压器可以用来测量活动衔铁位移的大小和方向。

3.2.2 测量电路

由于差动变压器的输出电压为交流，用交流电压表测量其输出值只能反映衔铁位移的大小，不能反映移动的方向。另外，其测量值必定含有零点残余电压。为了达到能辨别移动方向和消除零点残余电压的目的，实际测量时，常采用差动整流电路和相敏检波电路。

1. 差动整流电路

差动变压器最常用的测量电路是差动整流电路，如图 3.10 所示，把差动变压器的两个次级输出电压分别整流，然后将整流的电压或电流的差值作为输出。图(a)和图(b)为电压输出型，用于连接高阻抗负载电路，图中的电位器R_0用于调整零点残余电压。图 (c)和图(d)为电流输出型，用于连接低阻抗负载电路。采用差动整流电路后，不但可以用 0 值居中的直流电表指示输出电压或电流的大小和极性，还可以有效地消除残余电压，同时可使线性工作范围得到一定的扩展。

下面结合图 3.10(b)全波电压输出电路，分析差动整流电路的工作原理。

全波整流电路，是根据半导体二极管单向导通原理进行解调的。

设某瞬间载波为正半周，此时差动变压器两个次级线圈的相位关系为A正B负，C正D负；

在上线圈中，电流自A点出发，路径为$A\to1\to2\to9\to11\to4\to3\to B$，流过电容$C_1$的电流是由 2 到 4，电容$C_1$上的电压为$U_{24}$。

在下线圈中，电流自C点出发，路径为$C\to5\to6\to10\to11\to8\to7\to D$，流过电容$C_2$的电流是由 6 到 8，电容$C_2$两端的电压为$U_{68}$。

差动变压器的输出电压为上述两电压的代数和，即$U_2=U_{24}-U_{68}$。

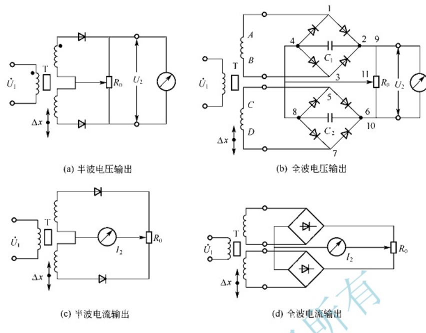


图 3.10　差动整流电路

同理，当某瞬间载波为负半周时，即两次级线圈的相位关系为 A 负 B 正、C 负 D 正，按上述分析可知，不论两个次级线圈的输出瞬时电压极性如何，流经 C_1 的电流方向总是从 2 到 4，流经电容 C_2 的电流方向总是从 6 到 8，可得差动变压器输出电压 U_2 的表达式仍为

$$U_2 = U_{24} - U_{68}$$

当铁芯在中间位置时，$U_{24} = U_{68}$，所以 $U_2 = 0$；

当铁芯在零位以上时，因为 $U_{24} > U_{68}$，则 $U_2 > 0$；

当铁芯在零位以下时，因为 $U_{24} < U_{68}$，则 $U_2 < 0$。

铁芯在零位以上或以下时，输出电压的极性相反，于是零点残余电压会自动抵消。由此可见，差动整流电路可以不考虑相位调整和零点残余电压的影响。此外，还具有结构简单、分布电容影响小和便于远距离传输等优点，获得广泛的应用。在远距离传输时，将此电路的整流部分放在差动变压器的一端，整流后的输出线延长，就可避免感应和引出线分布电容的影响。

2. 相敏检波电路

相敏检波电路的形式很多，过去通常采用分立元件构成的电路，它可以利用半导体二极管或三极管来实现。随着电子技术的发展，各种性能的集成电路相继出现，例如单片集成电路 LZX1，就是一种集成化的全波相敏整流放大器，它以开关元件的全波相敏解调器，能完成把输入交流信号经全波整流后变为直流信号，以及鉴别输入信号相位等功能。该器件具有重量轻、体积小、可靠性高、调整方便等优点。

差动变压器和 LZX1 的连接电路如图 3.11 所示。u_2 为信号输入电压，u_S 为参考输入电压，R 为调零电位器，C 为消振电容，若无 C 则会产生正反馈，发生振荡。移相器使参考电压和差动变压器次级输出电压同频率，相位相同或相反。

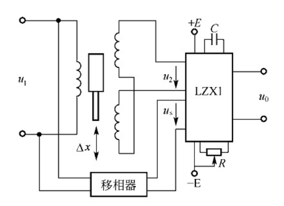


图 3.11　差动变压器和 LZXI 的连接电路

对于测量小位移的差动变压器，由于输出信号小，还需在差动变压器的输出端接入放大器，把放大的信号输入到 LZX1 的信号输入端。

一般经过相敏检波和差动整流输出的信号，还需通过低通滤波器，把调制时引入的高频信号衰减掉，只让铁芯运动所产生的有用信号通过。

3.2.3　零点残余电压及消除方法

与自感传感器相似，差动变压器也存在零点残余电压问题。它的存在使得传感器的特性曲线不通过原点，并使实际特性不同于理想特性。

零点残余电压的存在使传感器的输出特性在零点附近的范围内不灵敏，限制分辨率的提高。零点残余电压太大，将使线性度变坏，灵敏度下降，甚至会使放大器饱和，阻塞有用信号的通过，致使仪器不再反映被测量的变化。因此，零点残余电压是评定传感器性能的主要指标之一，必须设法减小和消除。消除零点残余电压的方法下几种

(1) 设计和工艺上保证结构的对称性

在设计和工艺上，力求做到磁路对称、线圈对称。铁芯材料要均匀，要经过热处理去除机械应力和改善磁性。两个二次侧线圈窗口要一致，两个线圈绕制要均匀一致。一次侧线圈绕制也要均匀。可采用拆圈的实验方法减小零点残余电压。其思路是，由于两个二次侧线圈的等效参数不相等，用拆圈的方法，使两者等效参数相等。

(2) 选用合适的测量线路

采用相敏检波电路不仅可以鉴别衔铁移动方向，而且可以把衔铁在中间位置时，因高次谐波引起的零点残余电压消除掉。

(3) 用补偿线路

在电路上进行补偿。线路补偿主要有：加串联电阻、加并联电容、加反馈电阻或反馈电容等。

图 3.12 所示为几个补偿零点残余电压的电路。在图 3.12(a)中，在输出端接入电位器 R_P(用于电气调零)，一般取 10k 希望左右，调节 R_P，可使两个二次侧线圈输出电压的大小和相位发生变化，从而使零点残余电压为最小值。这种方法对基波正交分量有明显的补偿效果，但对高次谐波无补偿作用。如果并联一只电容 C，就可以有效地补偿高次谐波分量，防止调整电位器时的零点移动,如图 3.12(b)所示。电容 C 的值要适当，常为 0.1μF 以下，要通过实验确定。在图 3.12(c)中，串联电阻 R 调整二次侧线圈的电阻值不平衡，由于两个次

级线圈感应电压相位不同，并联电容 C 可改变某一输出电势的相位，也能达到良好的零点残余电压补偿作用。在图 3.12(d)中，接入 R(几百千欧)或补偿线圈 L(几百匝)绕在差动变压器的次级线圈上，以减小二次侧线圈的负载电压，避免外接负载不是纯电阻而引起的较大的零点残余电压。

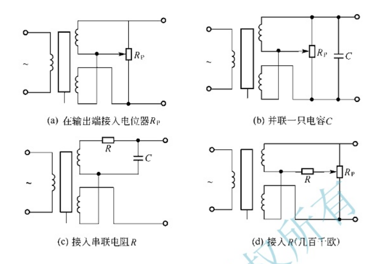


图 3.12　补偿零点残余电压的电路

【小思考】

差动变压式传感器不用测量电路可否完成测量?

3.3　电涡流式传感器

根据法拉第电磁感应定律，块状金属导体置于变化的磁场中或在磁场中作切割磁力线运动时，导体内将产生呈漩涡状流动的感应电流，称之为电涡流，这种现象称为电涡流效应。涡流的大小与金属体的电阻率 ρ 、磁导率 μ 、金属板的厚度以及产生交变磁场的线圈与金属导体的距离 x 、线圈的励磁电流频率 f 等参数有关。若固定其中若干参数，就能按涡流大小测量出另外的参数。

电涡流式传感器是基于电涡流效应而工作的传感器，可以对位移、振动、表面温度、速度、应力、金属板厚度及金属物件的无损探伤等物理量实现非接触式测量，具有结构简单、体积较小、灵敏度高、频率响应宽等特点，应用极其广泛。

电涡流式传感器在金属体中产生的涡流，其渗透深度与传感器线圈的励磁电流的频率有关。根据电涡流在导体的贯穿情况，通常把电涡流传感器按激励频率的高低分为高频反射式和低频透射式两大类，前者的应用较广泛。

3.3.1　工作原理

1. 高频反射式电涡流传感器

高频反射式电涡流传感器的结构比较简单，主要是一个安置在框架上的线圈，线圈可以绕成一个扁平圆形粘贴于框架上，也可以在框架上开一条槽，导线绕制在槽内而形成一个线圈。线圈的导线一般采用高强度漆包线，如要求高一些，可用银或银合金线，在较高

的温度条件下，须用高温漆包线。传感器的结构示意如图 3.13 所示。

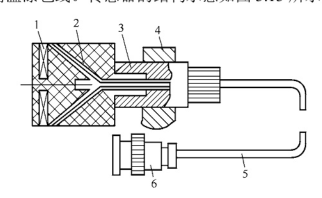


图 3.13　传感器的结构示意图

1—线圈；2—框架；3—框架衬套；4—支架；5—电缆；6—插头

如图 3.14(a)所示，传感线圈由高频电流 $\dot{I}_1$ 激磁，产生高频交变磁场 H_1，当被测金属置于该磁场范围内，金属导体内便产生涡流 $\dot{I}_2$，$\dot{I}_2$ 将产生一个新磁场 H_2，H_2 和 H_1 方向相反，因而抵消部分原磁场 H_1，从而导致线圈的电感量、阻抗和品质因数发生变化。

可见，线圈与金属导体之间存在磁性联系。若将导体形象地看做一个短路线圈，临近高频线圈 L 一侧的金属板表面感应的涡流对 L 的反射作用，可以用图 3.14(b)所示的等效电路说明。电涡流传感器类似于次级短路的空心变压器，可把传感器空心线圈看做变压器初级，线圈电阻为 R_1，电感为 L_1，金属导体中的涡流回路看做变压器次级，回路电流即 $\dot{I}_2$，回路电阻为 R_2，电感为 L_2，电涡流产生的磁场对传感器线圈产生的磁场的“反射作用”，可理解为传感器线圈与此环状电涡流之间存在着互感 M，其大小取决于金属导体和线圈的靠近程度，M 随着线圈与金属导体之间的距离 x 减小而增大。

根据图 3.14(b)所示的等效电路，按 KVL 可列出电路方程组为

$$\begin{cases} R_1\dot{I}_1 + \mathrm{j}\omega L_1\dot{I}_1 - \mathrm{j}\omega M\dot{I}_2 = \dot{U}_1 \\ R_2\dot{I}_2 + \mathrm{j}\omega L_2\dot{I}_2 - \mathrm{j}\omega M\dot{I}_1 = 0 \end{cases} \tag{3-28}$$

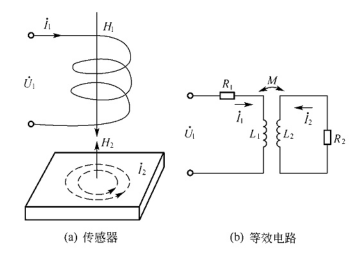
解此方程组可得电涡流传感器的等效阻抗为

$$Z = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} = R_1 + R_2\frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2} + \mathrm{j}\omega[L_1 - L_2\frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2}] \tag{3-29}$$

电涡流传感器的等效阻抗可表示为 $Z = R + \mathrm{j}\omega L$

等效电阻

$$R = R_1 + R_2\frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2} \tag{3-30}$$



(a) 传感器　　(b) 等效电路

图 3.14　高频反射式电涡流传感器

等效电感

$$L = L_1 - L_2 \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2} \tag{3-31}$$

线圈的品质因数由无涡流时的 $Q_0 = \omega L_1 / R_1$ 下降为

$$Q = \frac{\omega L}{R} = \frac{\omega L_1}{R_1} \cdot \frac{1 - \dfrac{L_2}{L_1} \cdot \dfrac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2}}{1 + \dfrac{R_2}{R_1} \cdot \dfrac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2}} \tag{3-32}$$

可见，由于涡流的影响，线圈复阻抗的实数部分增大，虚数部分减小，因此线圈的品质因数 Q 下降。

从上述分析结果表明，电涡流式传感器的等效电气参数，如线圈阻抗 Z、线圈电感 L 和品质因数 Q 值都是互感系数 M 平方的函数，而互感系数 M 又是线圈与金属导体之间距离 x 的非线性函数。由于金属导体的电阻率 ρ，金属导体的磁导率 μ 以及线圈激磁频率 f，将决定 H、R_2、L_2 和 M 的大小，因此可以说，高频透射式传感器的阻抗 Z、电感 L 和品质因数 Q 都是由 ρ、μ、x、f 等多参数决定的多元函数，若只改变其中一个参数，其余参数保持不变，便可测定这个可变参数。例如被测材料的情况不变，线圈激磁频率 f 不变，而 $Z = f(\rho、\mu、x、f)$，则阻抗 Z 就成为距离 x 的单值函数，便可制成涡流位移传感器。

2. 低频透射式电涡流传感器

图 3.15 所示为低频透射式涡流传感器结构原理图。在被测金属的上方设有发射传感器线圈 L_1，在被测金属板的下方设有接受传感器线圈 L_2。当在 L_1 上加低频电压 u_1 时，则在 L_1 上产生交变磁通 ϕ_1，若两线圈之间无金属板，则交变磁场直接耦合至 L_2 中，L_2 产生感应电压 u_2。如果将被测金属板放入两线圈之间，则 L_1 线圈产生的磁通将导致在金属板中产生电涡流 i_e，此时磁场能量受到损耗，到达 L_2 的磁通将减弱为 ϕ_2，从而使 L_2 产生的感应电压 u_2 下降。显然，金属板厚度尺寸 d 越大，穿过金属板到达 L_2 的磁通 ϕ_2 就越小，感应电压 u_2 也相应减小。因此，可根据 u_2 的大小得知被测金属板的厚度。

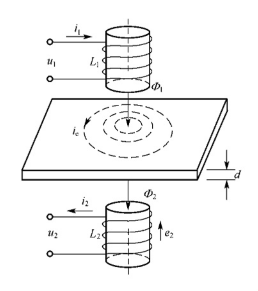


图 3.15　低频透射式涡流传感器结构原理图

u_2与d之间有着对应的关系，$u_2 = f(d)$，曲线如图 3.16 所示。由图可知，频率越低，$f_1 < f_2 < f_3$，磁通穿透能力越强，在接受线圈上感应的电压u_2也越高；频率较低时，线性较好，因此要求线性好时应选择较低的激励频率(通常为 1kHz 左右)；d较小时，f_3曲线的斜率较大，因此测薄板时应选较高的激磁频率，测厚板时应选较低的激磁频率。低频透射式涡流传感器的检测范围可达 1mm～100mm，分辨率为 0.1。

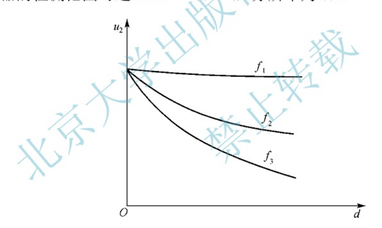


图 3.16　不同频率下的 $u_2 = f(d)$ 曲线

3.3.2　测量电路

根据电涡流测量的基本原理和等效电路，传感器线圈与被测金属导体间距离的变化可以转化为传感器线圈的品质因数Q、等效阻抗Z和等效电感L的变化。测量电路的任务是把这些参数的变化转换为电压或电流输出，可以用三种类型的电路：①电桥电路；②谐振电路；③正反馈电路。一般来说，利用Q值的转换电路使用较少，这里不作讨论。利用Z的测量电路一般用桥路，属于调幅电路。利用L的测量电路一般用谐振电路，根据输出是电压幅值还是电压频率，谐振电路又分为调幅和调频两种。

1. 电桥电路

这种电路结构简单，主要用于差动式电涡流传感器，如图 3.17 所示。图中L_1和L_2为差

动式传感器的两个线圈，分别与选频电容 C_1 和 C_2 并联组成相邻的两个桥臂，电阻 R_1 和 R_2 组成另外两个桥臂，电源 u 由振荡器供给，振荡频率根据涡流式传感器的需求选择。电桥将反应线圈阻抗的变化，线圈阻抗的变化将转换成电压幅值的变化。

当静态时，电桥平衡，输出电压 $u_{AB}=0$。

当传感器接近被测金属导体时，传感器线圈的阻抗发生变化，电桥失去平衡，即 $u_{AB}\neq 0$，经过线性放大和检波器检波后输出直流电压 U，显然此输出电压 U 与被测距离成正比，可以实现对位移量的测量。

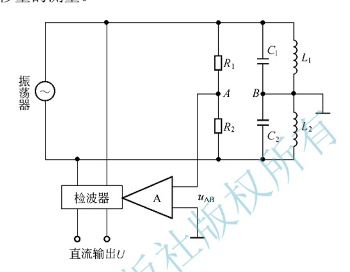


图 3.17　电桥电路

2. 谐振电路

这种方法是把传感器线圈与电容并联组成 LC 并联谐振电路。

并联谐振电路的谐振频率为

$$f_0=\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \tag{3-33}$$

谐振时 LC 并联谐振回路的等效阻抗最大，等于

$$Z_0=\frac{L}{R'C} \tag{3-34}$$

式中，R' 为谐振回路的等效电阻；L 为传感器线圈的自感。

当传感器接近被测金属导体时，线圈电感 L 发生变化，回路的等效阻抗和谐振频率将随着 L 的变化而变化，因此可以利用测量回路阻抗的方法或测量回路谐振频率的方法间接反映出传感器的被测量，相对应 r 就是调幅法和调频法。

1) 调幅法

电路由传感器线圈的等效电感和一个固定电容组成并联谐振回路，由频率稳定的振荡器(如石英晶体振荡器)提供高频激励信号，如图 3.18 所示。图中 R 为耦合电阻，可用来降低传感器对振荡器工作的影响，其数值大小将影响测量电路的灵敏度，耦合电阻的选择应考虑振荡器的输出阻抗和传感器线圈的品质因数。

电路的输出电压为

$$u=i_0 Z \tag{3-35}$$

式中，i_0为高频激磁电流；Z为 LC 回路的阻抗。

在初态时，传感器远离被测体，调整 LC 回路的并联谐振频率 $f_0 = 1/2\pi\sqrt{LC}$ 等于石英晶体振荡器频率，此时 LC 回路的阻抗 Z 最大，即 $Z_0 = L/R'C$，输出电压的幅值也是最大。

工作时，当传感器线圈接近被测金属导体时，线圈与被测体之间的距离 x 变化，导致线圈的等效电感 L 发生变化，谐振回路的谐振频率和等效阻抗也跟着发生变化，致使回路失谐而偏离激励频率，谐振峰将向左或右移动，如图 3.19 所示。

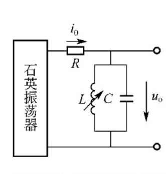


图 3.18　调幅法测量电路

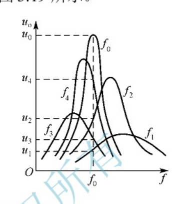


图 3.19　谐振调幅电路特性

从图(3.19)可见，若被测金属导体为非磁性材料，由于磁导率 μ 减小，传感器线圈的等效电感 L 减小，LC 回路的谐振频率提高，谐振曲线右移，对应的谐振频率为 f_1、f_2，回路等效阻抗减小，输出电压 u_o 减小到 u_1、u_2。若被测材料为磁性材料时，由于磁导率 μ 增加，谐振回路的等效电感 L 增大，LC 回路的谐振频率降低，谐振曲线左移，对应的谐振频率为 f_3、f_4，回路等效阻抗减小，输出电压 u_o 减小到 u_3、u_4。因此，可以由输出电压的变化来表示传感器与被测导体间距离 x 的变化，从而实现对位移量的测量，故称调幅法。

2) 调频法

测量电路如图 3.20 所示，传感器线圈作为组成 LC 振荡器的电感元件，当传感器的等效电感 L 发生变化时，引起振荡器的振荡频率变化，该频率可直接由数字频率计测得，或通过频率/电压转换后用数字电压表测量出对应的电压。这种方法稳定性较差，因为 LC 振荡器的频率稳定性最高只有 10^{-5} 数量级，虽然可以通过扩大调频范围来提高稳定性，但调频的范围不能无限制扩大。

采用这种测量电路时，不能忽略传感器与振荡器之间连接电缆的分布电容，几皮法的变化将使频率变化几千赫，严重影响测量结果，为此可设法把振荡器的电容元件和传感器线圈组装成一体。

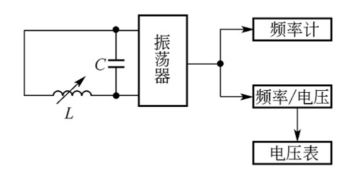


图 3.20　调频电路原理图

3. 正反馈电路

正反馈电路如图 3.21 所示，图中 Z_r 为一固定的线圈阻抗，Z_L 为传感器线圈电涡流效应的等效阻抗；D 为测量距离。放大器的反馈电路是由 Z_L 组成，当线圈与被测体之间的距离发生变化时，Z_L 变化，反馈放大电路的放大倍数发生变化，从而引起运算放大器输出电压变化，经检波和放大后使测量电路的输出电压变化。因此，可以通过输出电压的变化来检测传感器和被测体之间距离的变化。

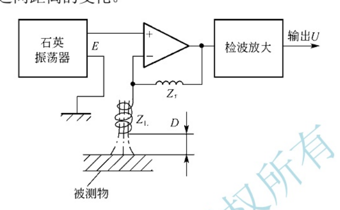


图 3.21　反馈法测量电路原理图

【小思考】

物体表面的光洁度能否用涡流传感器检测?

3.4　电感式传感器的应用

电感式传感器是被广泛采用的一种电磁机械式传感器，它除可直接用于测量直线位移、角位移的静态和动态量外，还可以它为基础，做成多种用途的传感器，用以测量力、压力、转矩等参数。

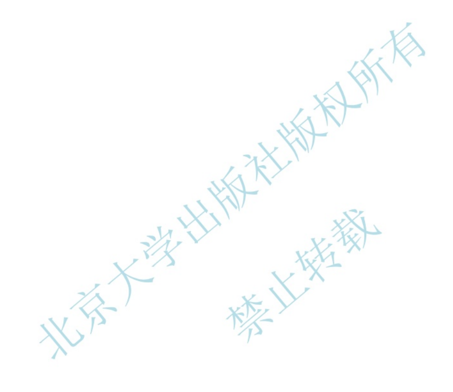
3.4.1　自感式传感器的应用

自感式传感器具有灵敏度比较好(可测 0.1 μm 的直线位移)、输出信号比较大、信噪比比较好、工艺要求不高、加工容易的特点，但是存在非线性，消耗功率较大，测量范围比较小的缺点。自感式传感器一般用于接触测量，可用于静态和动态测量，它主要用于位移测量，也可用于振动、压力、荷重、流量、液位等参数测量。

1. 自感式压力传感器

如图 3.22 所示为一种气体压力传感器的结构原理图，它采用了变隙式差动自感传感器。整个铁芯装在一个圆形的金属盒内，用接头螺纹与被测物相连接，2 为调节螺钉。当被测压力 P 变化时，C 型弹簧管 1 的自由端产生位移，带动与自由端刚性连接的自感传感器的衔铁 5 发生移动，使传感器的线圈 4 和 6 中的电感值一个增加另一个减小。电感的这种变化通过电桥电路转换成电压输出，由于输出电压与被测压力之间成比例关系，所以只要用检测仪表测量输出电压，即可得知被测压力的大小。传感器输出信号的大小决定于衔铁位

移的大小，输出信号的相位，决定于衔铁移动的方向。



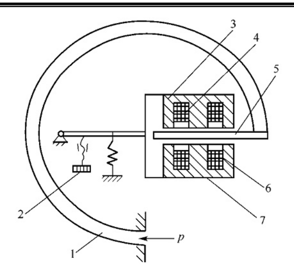


图 3.22 变隙差动式电感压力传感器

2. 自感式位移传感器

如图 3.23 所示为一个测量尺寸用的轴向自感式传感器(螺管式差动自感传感器)。可换测颈 10，用螺纹拧在测杆 8 上，测杆 8 可在钢球导轨 7 上作轴向移动。测杆上端固定着衔铁 3。当测杆移动时，带动衔铁 3 在电感线圈中移动，线圈 4 放在圆筒形磁心 2 中，线圈配置成差动形式，即当衔铁 3 由中间位置向上移动时，上线圈的电感量增加，下线圈的电感量减少。两个线圈用导线 1 引出，以便接入测量电路，测量力由弹簧 5 产生。防转销 6 用来限制测杆 8 的转动，密封套 9 用来防止尘土进入测量头内。滚动导轨上消除了径向间隙，使测量精度提高,并且灵敏度和寿命能达到较高指标。

3. 电感测厚仪

如图 3.24 所示，是用差动式自感传感器组成的测厚仪电路图。自感传感器的两个线圈 L_1 和 L_2 作为两个相邻的桥臂，另外两个桥臂是电容 C_1 和 C_2。桥路对角线输出端采用 4 只二极管 $\mathrm{VD}_1 \sim \mathrm{VD}_4$ 作为相敏整流器，用零值居中的电压表指示输出电压的大小和极性。在二极管中串接 4 个电阻 $R_1 \sim R_4$ 作为附加电阻，目的是为了减少由于温度变化所引起的误差，所以这四个电阻尽可能选温度系数较小的绕线电阻。电桥的电源由接在对角线的变压器 T 供给，变压器 T 输入绕组与 R_7 和 C_4 组成磁饱和交流稳压变压器电路。图中 C_3 起滤波作用，R_{P1} 为电桥电路调零电位器，R_{P2} 用来调节电压表满刻度用，HL 为指示灯。

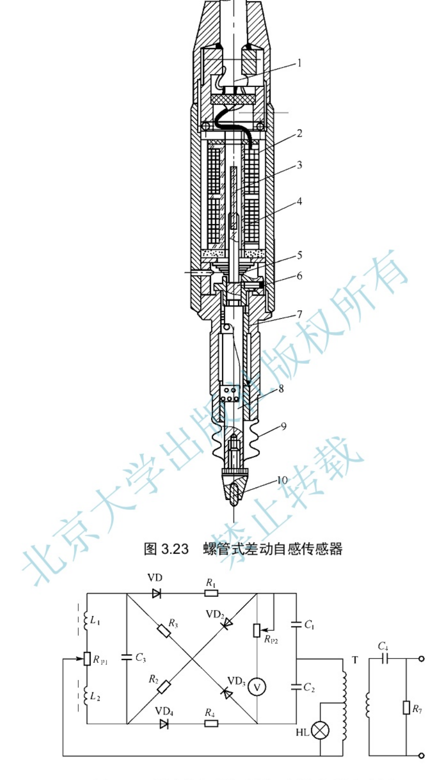


图 3.23　螺管式差动自感传感器

图 3.24　差动式自感传感器组成的测厚仪电路图

3.4.2　差动变压器的应用

差动变压器式传感器具有精度高(达 0.1μm 量级)，线圈变化范围大(可扩大到±l00mm，视结构而定)，结构简单，稳定性好等优点，被广泛应用于位移、加速度、压力、压差、液位、应变、比重、张力和厚度等参数的测量。

1. 加速度传感器

图 3.25 是差动变压器式加速度传感器结构原理图。加速度传感器由悬臂梁和差动变压器组成。测量时，将悬臂梁底座及差动变压器的线圈骨架固定，而将衔铁的 A 端与被测振动体相连，此时传感器作为加速度测量中的惯性元件，它的位移与被测的加速度成正比，使加速度的测量转变为位移的测量。当被测体带动衔铁以 Δx 振动时，差动变压器的输出电压也按相同的规律变化，通过输出电压值的变化间接地反映了被测加速度的变化。

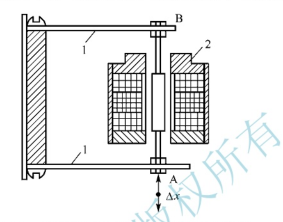


图 3.25 差动变压器式加速度传感器原理图

1—悬臂梁 2—差动变压器

2. 力平衡式差压计

利用差动变压器和弹性敏感元件相结合，可以组成开环的压力传感器和闭环的力平衡式压力计。如图 3.26 所示为力平衡式差压计电路图。从图中可见，力平衡式差压计的传感器实际上是一个差动变压器测量电路，图中 N_1、N_{21}、N_{22} 分别为差动变压器初级线圈和两个次级线圈，VD_1、VD_2 和 C 为半波整流电容滤波电路。当活动衔铁处于中间位置时，膜盒亦在正中间，此时膜盒的上下压力相同，即 $p_1=p_2$ 时，差动变压器输出电压 $U=0$。当 p_1 和 p_2 大小不同时，膜盒产生位移，从而带动固定在膜盒上的差动变压器的衔铁移位，使差动变压器输出电压 $U\neq0$，其大小和极性即表示活动衔铁位移的大小和方向，从而可测出 P_1 与 P_2 的压力差。

3. 张力传感器

图 3.27 是互感式压力传感器结构原理图，实际上它是把压力转变成铁芯微小位移的机构，再通过差动变压器将微小位移转换成与其成比例关系的电信号，在印刷、包装等工业生产中应用广泛，因为用印刷包装机械对卷绕的箔膜、纸张进行印刷、加工的过程中，随处都存在着张力，当存在着张力的箔膜、纸张通过某些可以转动的辊或轴，就可以把张力变成压力，进而转变成位移，产生代表当前张力大小的电信号，所以互感式压力传感器也称之为张力传感器。

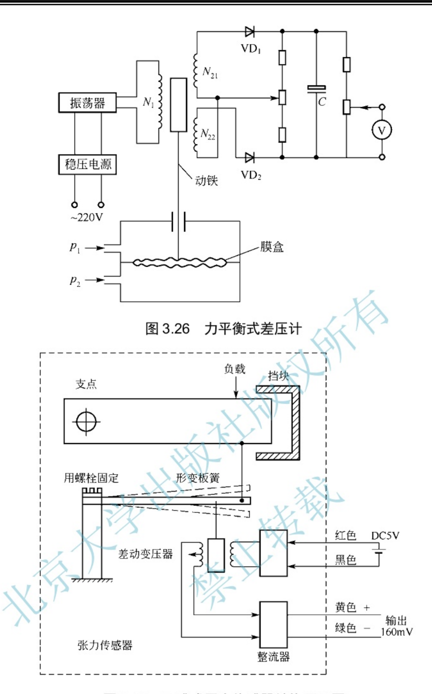


图 3.26　力平衡式差压计

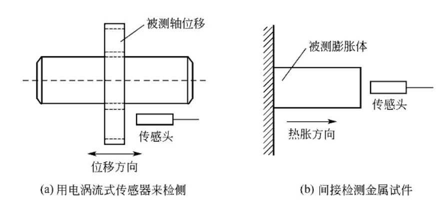
图 3.27　互感式压力传感器结构原理图

3.4.3　电涡流式传感器的应用

电涡流式传感器由于具有测量范围大，灵敏度高，结构简单，抗干扰能力强，可以实现非接触式测量等优点，被广泛地应用于工业生产和科学研究的各个领域，可以用来测量位移、振幅、尺寸、厚度、热膨胀系数、轴心轨迹和金属件探伤等。

1. 位移计

电涡流传感器的基本应用是组成位移计，可以用来测量各种形状试件的位移，如图 3.28 所示。其中图 3.28(a)中用电涡流式传感器来检测汽轮机主轴的轴向位移量，图(b)是间接检测金属试件的轴向热膨胀量。

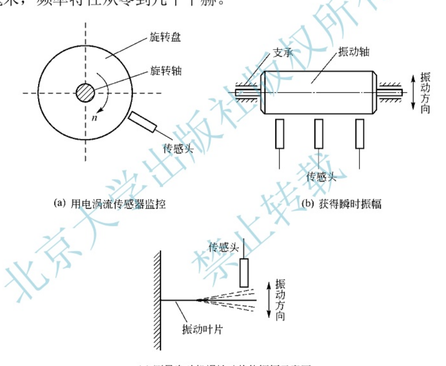


(a) 用电涡流式传感器来检侧　　(b) 间接检测金属试件

图 3.28　位移计

2. 振动计

电涡流传感器还可以实现对振动的无接触测量，如图 3.29 所示。测量的振幅范围可从几微米到几毫米，频率特性从零到几十千赫。



(a) 用电涡流传感器监控　　(b) 获得瞬时振幅

(c) 测量发动机涡轮叶片的振幅示意图

图 3.29　振动计

如图 3.29(a)所示，在汽轮机和空气压缩机中，常用电涡流传感器监控主轴的径向振动，通常在轴的附近并排地安置数个传感器探头，在轴振动时，可以获得各个传感器所在位置轴的瞬时振幅，用多通道记录仪输出至记录仪，如图 3.29(b)所示。图 3.29(c)为测量发动机涡轮叶片的振幅示意图，在叶片作振动疲劳实验时可用来监视叶片共振时的振幅。

3. 厚度计

电涡流传感器可以无接触地测量金属板的厚度和非金属板的镀层厚度，如图 3.30 所示为高频反射式电涡流测厚计原理图。

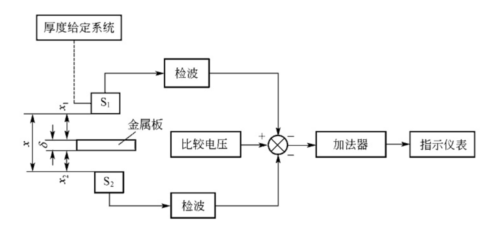


图 3.30　高频反射式电涡流测厚计原理图

为了克服金属板在工作过程中上、下波动的影响，在金属板上、下两侧对称地设置了两个特性完全相同的涡流传感器 S_1、S_2。S_1、S_2 与被测金属板之间的距离分别为 x_1 和 x_2，这样板厚 $\delta = x - (x_1 + x_2)$，当两个传感器在工作时分别测得 x_1 和 x_2，转换成电压值后相加。相加后的电压值与两传感器之间距离 x 对应的设定值相减，就得到与金属板厚度相对应的电压值。

4. 转速计

在一个旋转体上开一条或数条槽，或者加工成齿轮状，旁边安装一个电涡流传感器。当旋转体传动时，传感器将周期性地改变输出信号，此电压信号经过放大整形后，可用频率计指示出频率值，可由式(3-56)算出转速为

$$n = 60\frac{f}{N} \tag{3-36}$$

式中，f 为输出信号的频率(Hz)；N 为旋转体的齿数；n 为被测体的转速(r/min)。

5. 涡流探伤

电涡流式传感器可以对被测对象进行非破坏性的探伤，例如检查金属的表面裂纹、热处理裂纹以及焊接部位的探伤等。在检查时，使传感器与被测体的距离不变，如有裂纹出现时，导体电阻率、磁导率发生变化，从而引起传感器的等效阻抗发生变化，通过测量电路达到探伤的目的。

此外，涡流传感器还可制成开关量输出的检测元件，这时可使测量电路大为简化。目前，应用比较广泛的有接近开关，也可用于技术金属零件的计数。

本 章 小 结

本章主要介绍了利用自感原理的自感式传感器(通常称为电感式传感器)，利用互感原理的互感式传感器(通常称为差动变压器式传感器)，利用涡流原理的电涡流式传感器。

按磁路几何参数变化形式的不同，目前常用的自感式传感器有变气隙式、变面积式和螺结管式这 3 种。以变气隙式自感传感器为例，介绍了单线圈变隙式和差动变隙式电感传感器的结构和工作原理，详细分析了测量范围与灵敏度和线性度之间的关系。与单线圈变隙式电感传感器相比，采用差动变隙式结构，电感传感器的灵敏度提高了一倍，线性度得到明显改善。

还详细介绍了自感式电感传感器的各种测量电路的工作原理，测量电桥引入相敏整流电路后，输出特性曲线通过零点，输出电压的极性随位移方向而发生变化，同时消除了零点残余电压，还增加了线性度。

差动变压器结构形式较多，有变隙式、变面积式和螺线管式等。以螺线管式差动变压器为例，详细介绍了差动变压器的结构、工作原理、等效电路。为了达到能辨别移动方向和消除零点残余电压的目的，实际测量时，常采用差动整流电路和相敏检波电路。与自感传感器相似，差动变压器也存在零点残余电压问题，本章详细介绍了零点残余电压的定义、不良影响及消除的方法。

根据电涡流在导体的贯穿情况，通常把电涡流传感器按激励频率的高低分为高频反射式和低频透射式两大类，本章详细分析了高频反射式和低频透射式电涡流传感器的工作原理，介绍了电涡流式传感器的电桥电路、谐振电路和正反馈电路等测量电路。

思考题与习题

3-1 填空题

（1）常用自感式传感器有（　　　　）、（　　　　）和（　　　　）三种类型。

（2）涡流效应形成的条件有（　　　　　　　　）和（　　　　　　　　）。

（3）利用互感原理的传感器有（　　　　　　）和（　　　　　　）。

3-2 变隙式电感传感器的灵敏度与哪些因素有关，要提高灵敏度可采取哪些措施？

3-3 带相敏整流的电桥电路具有哪些优点？

3-4 差动变压器式传感器有几种结构形式？各有什么特点？

3-5 差动变压器式传感器的等效电路包括哪些元件和参数？各自的含义是什么？

3-6 什么是差动变压器的零点残余电压？产生的原因是什么？怎样减小和消除它的影响？

3-7 用差动变压器测量液位，画出示意图，说明测量的原理。

3-8 简述电涡流效应的工作原理，怎样利用电涡流效应进行位移测量？

3-9 电涡流传感器分为几类？它们的主要特点是什么？简述工作原理。

3-10 电涡流传感器常用的测量电路有几种？其测量原理如何？各有什么特点？

3-11 如何利用电涡流传感器测量金属板厚度？

3-12 一石油运输管道，需要检测是否有漏油处，说明检测方法，并简述所用传感器的工作原理。